

MÁSTER EN CONSTRUCCIÓN AVANZADA EN LA EDIFICACIÓN

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

**MEJORA EN LAS PROPIEDADES DE MORTEROS Y HORMIGONES HAC
MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES Y DE
ANTI RETRACCIÓN**

Agradecimientos

A mi tutora la Química Laia Haurie por su colaboración, su asistencia y el tiempo que se tomó para dar asesorías durante todo el proceso de este trabajo.

A la empresa MC Spain por contribuir con los materiales para llevar a cabo los ensayos de la práctica, particularmente al Químico Oscar Gines quien, además de ser el intermediario entre la empresa y la universidad, fungió como proveedor y supervisor, estando atento en cada etapa del proyecto para resolver cualquier duda.

Al Arquitecto técnico e ingeniero Joan Ramon Rosell quien en las etapas finales acepto formar parte de esta investigación como codirector.

Al equipo de profesores y personal del laboratorio de materiales de la EPSEB, Antonia, Mark, Rubén y Christofer no solo por compartir las herramientas y equipos para los ensayos, si no por estar con la disposición de asesorar y aconsejar para su correcta utilización.

A mi familia y amigos que, a pesar de la distancia, siempre han estado al pendiente para brindarme su apoyo.

Agradecimiento y dedicatoria especial a dos personas que fueron quienes hicieron que todo esto fuera posible, comenzando con Mariana Aceves por ser mi mayor soporte en todo momento, y finalmente al Arquitecto Justin Kinsella por darme la oportunidad de seguir colaborando a distancia durante el año y medio que tuvo de duración este máster.

RESUMEN

El presente documento pretende comprobar por medio teórico y experimental la dosificación ideal de aditivos superplastificantes y de reducción de retracción, añadidos en morteros y hormigones arquitectónicos autocompactantes de altas prestaciones (HAC) para la mejora en sus propiedades físicas y mecánicas.

INDICE

CAPITULO 1 ESTADO DEL ARTE.....	6
I. CEMENTOS.....	6
1.1.1 Hidratación del cemento. Concepto General.....	6
1.1.2 Componentes del cemento portland.....	6
1.1.3 Componentes secundarios.	8
1.1.4 Fraguado y endurecimiento del cemento portland.	10
1.1.5 Calor de hidratación.....	10
1.1.6 Factores y variantes que influyen en el proceso de hidratación.	12
1.7 Estructura porosa.	17
1.1.8 Estabilidad del volumen.....	18
1.1.9 Durabilidad.....	19
II. ADITIVOS.....	21
1.2.1 Tipos de aditivos.....	21
1.2.2 Aditivos superplastificantes.....	22
1.2.3 Aditivos reductores de retracción.....	26
1.2.4 Aditivos reductores de retracción.....	29
1.2.5 Hormigones arquitectónicos autocompactantes de altas prestaciones (HAC)	31
CAPITULO 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	33
I. MATERIALES.....	33
II. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES	35
III. DOSIFICACIONES.....	36
IV. EQUIPOS DE LABORATORIO	37
V. ENSAYOS.....	41
VI. MEDICIONES Y PRUEBAS.....	47
VII. RESULTADOS.....	52
CAPITULO 3 COMENTARIOS Y DISCUSION.....	67
I. CONCLUSIONES.....	70

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. INFLUENCIA RELACION AGUA/CEMENTO EN RESISTENCIA ¹	13
TABLA 2. ESPECIFICACIÓN DE CEMENTOS POR TIPO SEGÚN NORMA ASTM.....	17
TABLA 3. PORCENTAJE DE COMPUESTO DE ACUERDO CON EL TIPO DE CEMENTO SEGÚN NORMA ASTM	17
TABLA 4. CANTIDAD DE AMASADOS A REALIZAR.	35
TABLA 5. PORCENTAJE COMPOSICIÓN DE MEZCLA	37
TABLA 6. RESISTENCIA A FLEXIÓN POR AMASADO A 1,7 Y 28 DÍAS.	52
TABLA 7. RESISTENCIA A COMPRESIÓN POR AMASADO A 1,7 Y 28 DÍAS.....	56
TABLA 8 VALORES DE RETRACCIÓN A 28 DÍAS DE CADA AMASADO.	60
TABLA 9. RESULTADOS DEFORMACIÓN DE LOSETAS	63
TABLA 10. RESULTADOS MÓDULO DE ELASTICIDAD.	64
TABLA 11. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE POROSIDAD.....	65
TABLA 12. RESUMEN VALORES MÁXIMOS OBTENIDOS DE CADA ENSAYO SP1	66
TABLA 13. RESUMEN VALORES MÁXIMOS OBTENIDOS DE CADA ENSAYO SP2	66
TABLA 14. RESUMEN VALORES MÁXIMOS OBTENIDOS DE CADA ENSAYO SP3	66

INTRODUCCIÓN

El empleo de productos derivados de cemento tales como hormigones y morteros son indispensables en la creación de infraestructura moderna gracias a su costo, maleabilidad, y resistencia, de tal forma que la industria está en constante búsqueda de componentes que aporten mejoras en sus elementos para incrementar su desempeño ya sea al momento de su elaboración, así como el comportamiento que este tendrá durante su vida útil. A su vez se pretenden buscar nuevas formas de grandes dimensiones en luces y secciones reducidas, este último es el campo de interés por el cual la empresa MC Spain busco colaborar en esta investigación aportando los materiales a utilizar para la práctica.

Si hablamos tanto de hormigones y morteros de altas prestaciones (UHPC), como de los arquitectónicos autocompactantes (HAC), se puede mencionar que hoy en día son uno de los materiales pétreos que más se están empleando en la construcción, ya que, a diferencia de los materiales cementosos normales, estos cuentan con una mejora en sus propiedades físicas que dan un incremento en su resistencia y durabilidad.

llevar a cabo la elaboración de estos materiales, conlleva el empleo de distintos tipos de aditivos. En este trabajo se pretende estudiar el efecto sobre las propiedades de morteros y hormigones de cemento portland, mezclados con ciertos aditivos superplastificantes y en combinación con aditivos reductores de retracción a distintas dosificaciones, ya que existen estudios que apuntan a la existencia de un efecto sinérgico entre dichos materiales, tal como lo muestra la investigación de la universidad de Peter the Great St. Petesburg Polytechnic University, en el artículo de “*The Superplasticizer influence on the efficiency of the anti-shrinkage additives*”¹, dicho artículo funciona como punto de partida para desarrollar esta práctica.

¹ (Barabanshchikov, Arkharova, & Ternovskii, 2014)

CAPITULO 1 ESTADO DEL ARTE.

I. CEMENTOS

1.1.1 Hidratación del cemento. Concepto General.

Hablar sobre la hidratación del cemento, es un tema clave para comprender la influencia que tienen cualquier tipo de aditivos en un mortero. La hidratación se debe a una reacción química exotérmica entre las partículas de cemento que al entrar en contacto con el agua se van hidratando por capas superficialmente, formando estructuras cristalinas o enlaces. Dichas partículas de cemento al seguir en contacto con el agua se seguirán hidratando paulatinamente en su interior reduciendo su tamaño y aumentando el volumen de sus cristales, los cuales posteriormente, son quienes darán rigidez al material una vez finalizado el proceso de fraguado. Pero para que una partícula de cemento termine de hidratarse por completo y adquiera la resistencia final del material, tienen que pasar varias etapas después de que finalice el fraguado, dichas etapas pueden tardar inclusive años y serán explicadas más adelante.¹

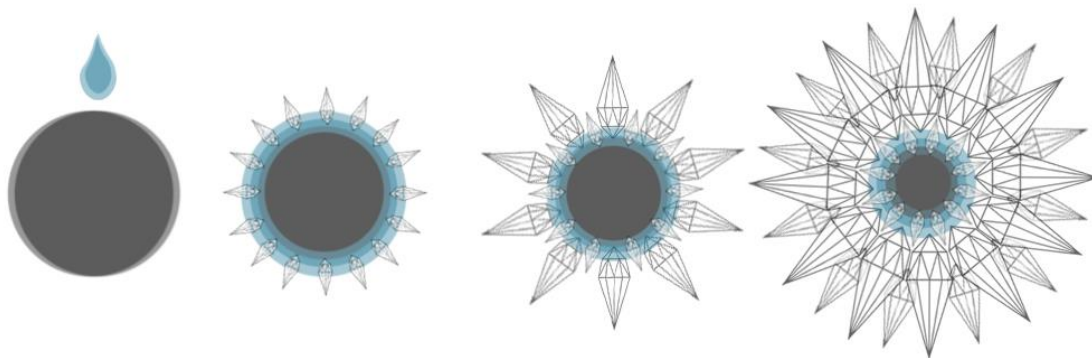


Figura 1. Diagrama de hidratación del cemento

La reacción química en la fase de hidratación es llamada exotérmica ya que se desprende una gran cantidad de calor, y es tan compleja que es importante explicar independientemente el papel que desempeña cada componente químico del cemento en este proceso.

1.1.2 Componentes del cemento portland.

Clinker de cemento portland.

El Clinker de cemento, que básicamente es el mismo cemento antes de añadirle yeso para retardar el fraguado, se compone principalmente de dos elementos, piedras calizas en un 75% y arcillas en

¹ (Lamond & Pielert, 2006)

un 25% los cuales son mezcladas, molidas y sometidas a temperaturas entre 1400° y 1450° en proporciones adecuadas dentro de hornos rotatorios, dando como resultado una variedad de componentes, de los cuales principalmente se obtienen cuatro; Silicato tricálcico (C_3S), Silicato dicálcico (C_2S), Aluminato tricálcico (C_3A) y Ferroatuminato tetracálcico (C_4AF).¹

Las propiedades de los principales componentes del cemento portland en relación a su reacción química con el agua se catalogan de acuerdo a los siguientes conceptos.

- 1) su aporte a la resistencia a compresión.
- 2) cantidad de calor que libera.
- 3) velocidad de reacción.

i) Silicato tricálcico ($3CaO \cdot SiO_2 = C_3S$).

El Silicato tricálcico compone el 50% del peso del material y es uno de los componentes que tiene mayor velocidad de hidratación ya que a los 28 días de haberse amasado con agua, se hidrata alrededor del 60% de su contenido y es quien durante esta etapa aportara la mayor cantidad de resistencia total del cemento. En este proceso el desprendimiento de calor es elevado ya que al hidratar a una velocidad alta es mayor la cantidad de temperatura que se genera.²

ii) Silicato dicálcico ($2CaO \cdot SiO_2 = C_2S$).

El Silicato dicálcico compone el 25% del peso de material y a los 28 días se hidratará únicamente el 20% de su contenido, de tal forma que tanto el calor que genera y su resistencia será menor. Dicha resistencia la ira igualando con el tiempo.²

iii) Aluminato tricálcico ($3CaO \cdot Al_2O_3 = C_3A$).

El aluminato tricálcico por su parte compone el 12% del peso del material y no aporta nada en resistencia, aunque debido a su solubilidad tiene una velocidad de hidratación instantánea, de forma que el desprendimiento de calor es tal, que será el principal responsable de causar la reacción química a la hora del fraguado, misma velocidad producirá el efecto de retracción, aunque ésta será absorbida debido a que la masa está en estado plástico y no tendrá repercusiones de fisuras o quebrantos. El Aluminato tricálcico es un compuesto que, en grandes cantidades, aumenta la velocidad del fraguado, pero al mismo tiempo, crea una mala resistencia a los sulfatos. El yeso

¹ (Manual del constructor Cemex, s.f.)

² (Sanjuán & Chinchón, 2004) (Lamond & Pielert, 2006)

agregado al cemento en el proceso de elaboración se combina con este componente para controlar dicho tiempo de fraguado.¹

iv) Ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$).

El Ferroaluminato tetracálcico es el resultante de la utilización de óxido de hierro en el horno de fabricación que ayuda a disminuir el C_3A y posteriormente se forma C_4AF el cual compone el 8% del peso, su contribución con la hidratación es baja y su aporte en resistencia es nulo. Por otra parte, este componente es quien dará el tono gris al cemento.¹

Yeso.

Una vez enfriado el clinker se le añade de un 3% a 5% de yeso, como se mencionó anteriormente se combinará con el aluminato tricálcico para controlar la velocidad al momento de agregar el agua en el proceso de hidratación, ya que, si se utilizara el clinker puro, este sería imposible de ser manipulado debido a que tiene una reacción química instantánea. Por otro parte, el yeso es un componente que tiene que ser utilizado cuidadosamente ya que es el principal causante de ataques sulfáticos los cuales serán explicados más adelante.¹

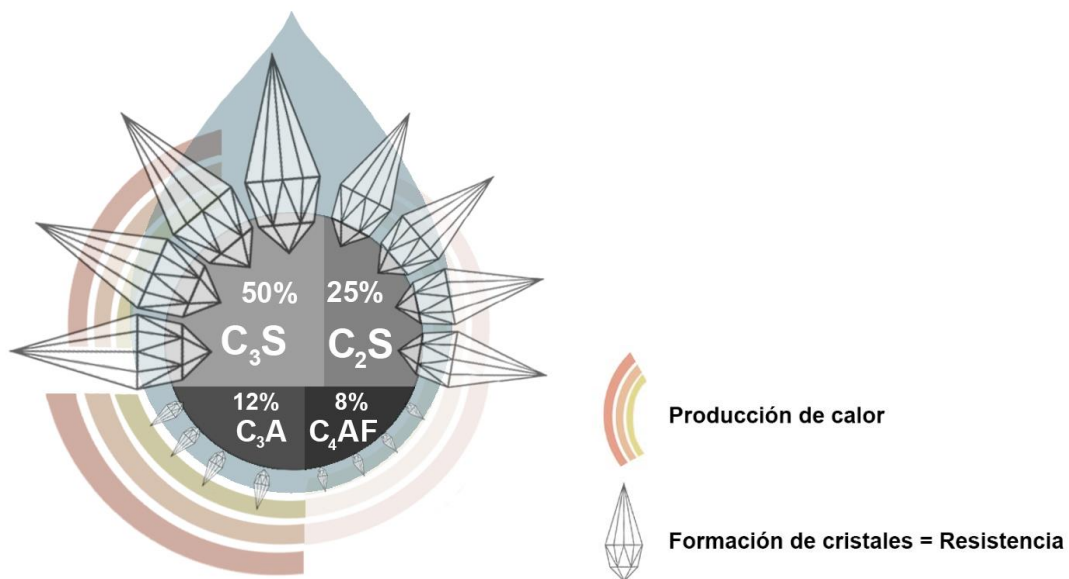


Figura 2. Diagrama calor y resistencias de hidratación por componente del cemento

1.1.3 Componentes secundarios.

Los componentes secundarios o componentes minoritarios son los materiales minerales tanto naturales como derivados del proceso de fabricación del Clinker, los cuales son seleccionados y

¹ (Sanjuán & Chinchón, 2004) (Lamond & Pielert, 2006) (Trujillo, 2011)

controlados ya que reaccionan químicamente entre los distintos componentes principales del cemento y los agentes medio ambientales, ya sea en el momento de fabricación y almacenaje como en su futura puesta en obra.

Entre estos componentes se encuentran la Cal libre (CaO), la Magnesia libre (MgO), los Álcalis (Na_2O y K_2O) y finalmente el Trióxido de azufre (SO_3). Se busca que estos componentes no aumenten la demanda de agua ni afecten la resistencia de la estructura, de lo contrario se pretende conseguir una mejora en las propiedades físicas del material, principalmente en la retención de agua. Por otra parte, si no se regulara su porcentaje añadido y este superara el 5% aproximado en peso, se obtendrían problemas de expansiones, resistencias y durabilidad de la estructura, dichos problemas serán explicados más adelante.¹

En las siguientes graficas podemos analizar a manera de resumen el comportamiento que tienen los distintos componentes principales del cemento, en la Figura 3. podemos observar que el C_3A tiene el mejor resultado en cuanto a velocidad de hidratación sin embargo podemos ver en la Figura 4. que su contribución en resistencia es bastante baja, mientras que el C_3S disminuye un poco la velocidad, pero su resistencia es casi inmediata y bastante alta, por otro lado, el C_2S vemos que su velocidad de hidratación es la más baja, de tal manera que su resistencia la ira adquiriendo con el tiempo y finalmente como se mencionó el C_4AF su velocidad de hidratación es baja y su resistencia nula.²

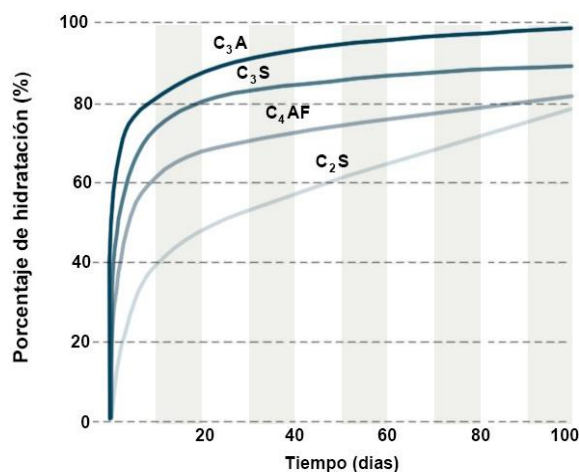


Figura 3. Grafica del porcentaje de hidratación de los componentes de cemento en el tiempo²

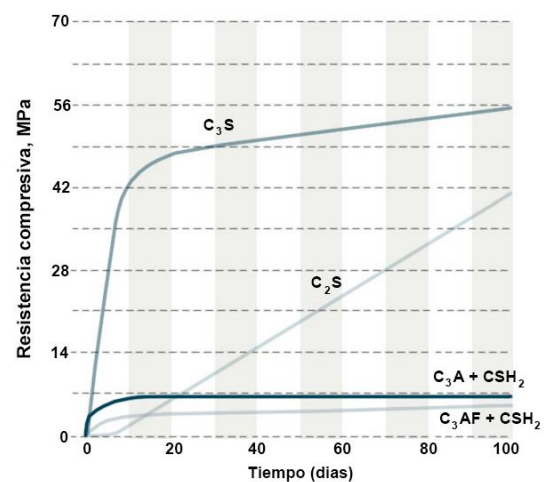


Figura 4. Desarrollo de resistencias de los componentes puros.²

¹ (Sanjuán & Chinchón, 2004) (Lamond & Pielert, 2006)

² (Bogue, 1955)

1.1.4 Fraguado y endurecimiento del cemento portland.

Se conoce como fraguado al proceso de plastificación de la masa de cemento de estado líquido a estado sólido. Se identifican principalmente dos tipos de tiempos de fraguado, fraguado inicial que es el momento en el que, al agregar agua al cemento, este aumenta su temperatura, queda parcialmente hidratada y comienza su rigidez. Posteriormente el fraguado final es cuando la pasta endurece y adquiere una resistencia significativa, en ese momento está altamente hidratado, pero no del todo.¹

El tiempo de fraguado inicial ocurre entre una y cuatro horas de haberse mezclado los componentes del mortero, y es durante este periodo que se definirá el límite de manejo de la masa, teniendo la suficiente rigidez que de ser vibrado se dañaría su estructura interna, de tal forma que a partir de la finalización de esta etapa es que el material determinara su forma final.

Tanto el fraguado inicial como el final se pueden precisar por medio de ensayos de resistencia a penetración.¹

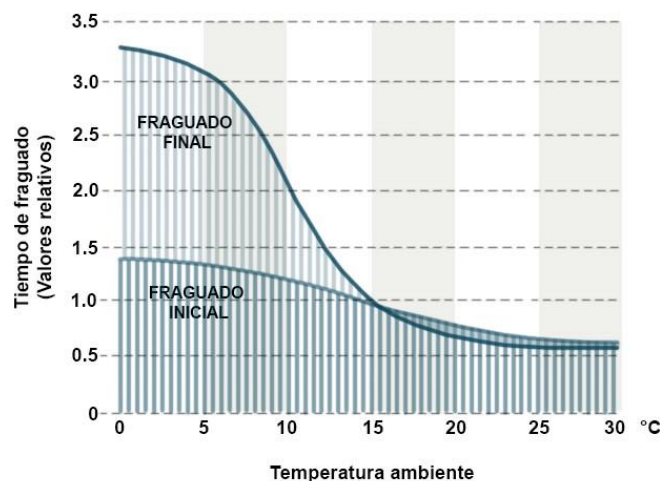


Figura 3. Grafica relación fraguado inicial con fraguado final. ¹

1.1.5 Calor de hidratación.

El calor de hidratación, como se mencionó anteriormente es el principal factor para que se lleve a cabo la reacción química del fraguado y este se debe al aumento de temperatura que generan las partículas de cemento al entrar en contacto con el agua y depende de la cantidad de esta para determinar el tiempo en el que se llevara a cabo las etapas desde el endurecimiento hasta la resistencia final del material, dichos procesos se miden en cinco etapas.

¹ (Oviedo, Leccion 7, 2016)

- 1) Calor de humedecimiento o hidrolisis inicial, este es el primer momento en el que el Silicato tricálcico C_3S y el Aluminato tricálcico C_3A comienzan a hidratarse de tal forma que hay una rápida evolución de calor y la masa comienza a plastificar.¹
- 2) La segunda etapa llamada inducción, se caracteriza por una inactividad en la que la masa se mantiene en completo estado plástico haciéndose más manejable ya que el consumo de agua por parte de las partículas de cemento es muy bajo.¹
- 3) una vez finalizada la etapa de inducción comienza el fraguado inicial o solidificación en el que el silicato tricálcico de nuevo aumenta la velocidad de hidratación ya que la cal comienza a cristalizar dando paso al H_2O hacia el núcleo de la partícula.¹
- 4) La cuarta etapa es el periodo de deceleración, en este momento es cuando existe una constante entre la velocidad de reacción y la de difusión, esto quiere decir que la reacción de hidratación dependerá de la cantidad de agua que la capa que forma la cristalización permita dar paso al interior del núcleo de la partícula, en un inicio es estable pero esta ira disminuyendo conforme el material va rigidizando de tal manera que en este periodo está prácticamente definida su forma final.¹
- 5) el quinto y último periodo es el de difusión estacionario, en esta etapa el espesor de los enlaces cristalinos es tan denso que la velocidad de hidratación disminuye considerablemente y seguirá hasta que ya no haya más C_3S que hidratar. Es en esta etapa que adquirirá su resistencia final.¹

Así pues, se determina que el primer pico de calor es debido a las reacciones químicas de los componentes del cemento con el agua y este se lleva a cabo durante los primeros minutos del fraguado, El segundo pico se debe a la hidratación del silicato tricálcico y se caracteriza por el endurecimiento de la pasta. Finalmente hay un tercer pico y se debe a la reacción renovada del Aluminato tricálcico (C_3A), la intensidad de esta dependerá principalmente de la cantidad de aluminato tricálcico y de sulfatos en el cemento. Figura 4.²

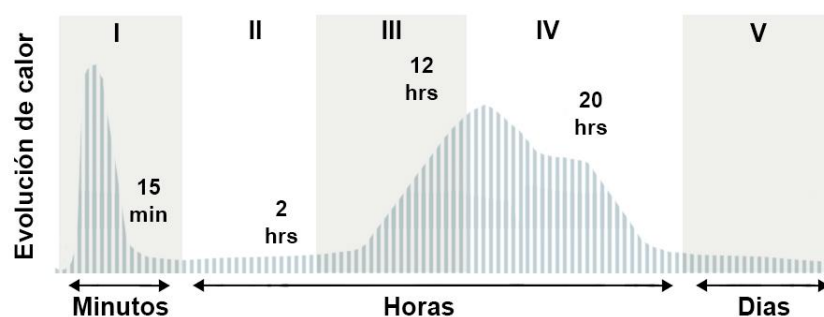


Figura 4 Evolución de calor en el tiempo. ²

¹ (Oviedo, Leccion 7, 2016)

² (Oviedo, Leccion 7. Hidratacion del cemento portland, s.f.)

1.1.6 Factores y variantes que influyen en el proceso de hidratación.

Existen a su vez distintos factores que intervienen en el proceso de hidratación, como la relación agua- cemento, el tipo y finura del cemento, finalmente la temperatura ambiental en el momento del curado.

Composición química.

En cuanto a la composición química, sabemos que los elementos principales que dan inicio al aumento de temperatura en la hidratación son las partículas de C_3A y C_3S , de tal forma que al tener cementos con alto contenido en estos elementos creara materiales con una velocidad de hidratación bastante elevada, por una parte, dicho aumento de temperatura en materiales de masa reducida es conveniente ya que es más sencillo liberar el calor y entrar a temperatura ambiente. Sin embargo, en estructuras de dimensiones considerables pueden ser indeseables puesto que un endurecimiento a altas temperaturas, el enfriamiento a temperatura ambiente no uniforme puede causar tensiones, de tal forma que es importante regular su contenido.¹

Finura.

La finura del cemento va a depender del tiempo de molido del Clinker en el proceso de fabricación y será directamente proporcional al valor hidráulico que posee el grano, ya que, al ser más pequeño, menor será la superficie a hidratar, por consiguiente, el agua llegará al núcleo con mayor facilidad. Por otra parte, como se mencionó en el apartado anterior, con relación al aumento de velocidad de hidratación causada por el C_3A y C_3S , el tamaño del grano de igual forma estará ligada a esto ya que al aumentar la finura del cemento, significa una mayor cantidad de estos elementos.

El grano de cemento se mide en m^2 por kg, y el valor de finura va de las 3 a las 30 micras, siendo la menor la más ideal mientras que una cantidad mayor a 30 es inservible ya que es prácticamente imposible que sea hidratada.¹

Relación agua-cemento.

La relación agua/cemento es un factor muy importante vinculado a las resistencias que el hormigón vaya a tener, se considera que la más óptima es 0.45 aproximadamente, mientras que una relación más baja puede otorgar un aumento en dichas resistencias, una relación más alta le brinda mejores características de manejabilidad, sin embargo, su resistencia se reduce debido a

¹ (Skalny & Young, 1980)

porosidad formada por los espacios creados por el agua libre. Las relaciones de estos valores se pueden observar en la tabla 1.¹

Tabla 1. Influencia relacion agua/cemento en resistencia ¹

A/C	Fc (Kg/cm ²)
0.36	420
0.40	370
0.45	340
0.50	295
0.55	275
0.60	230
0.65	220
0.70	185
0.75	165
0.80	140

Temperatura.

La temperatura también influye en el proceso de hidratación. Se determina que la temperatura ideal es de 20°C, mientras que a temperaturas mayores aproximadas a 35-40°C, sobre todo sin humedad relativa, el hormigonado con características comunes no es recomendable, ya que la pérdida de agua por evaporación es excesivamente elevada, por otra parte, al tener temperaturas inferiores a 5°C tampoco es recomendable ya que pueden surgir problemas de congelamiento del agua de fraguado. Existen diversos procesos y variantes que se pueden seguir para obtener resultados óptimos en el proceso de hidratación y curado, ya sea en climas cálidos o fríos, entre los más importantes están la relación agua-cemento, mayor cantidad en climas cálidos y menor en climas fríos, enfriar y calentar el agua de amasado, utilizar cementos de alto o bajo calor de hidratación, utilizar aditivos añadidos y sobre todo realizar un buen proceso de curado, ya que la pérdida de humedad en el hormigón no solo se da en climas cálidos si no que sufre los mismos efecto en climas fríos.²

Tipos de cementos.

En la actualidad existe una gran variedad de tipos de cementos a los cuales en su fabricación se les ha añadido componentes químicos para obtener una mejora en su desempeño de acuerdo con ciertas características que se requieran en su puesta en obra, con relación a resistencias, temperatura ambiental, tiempos de fraguado, entre otros.

¹ (Guevara, Hidalgo, & Pizarro, 2011)

² (Skalny & Young, 1980)

Los principales tipos de cemento son.

I) Cementos comunes (CEM).

Se componen principalmente por cemento portland el cual, como se explicó en el apartado 1.1.2 se compone de clinker de cemento portland con una reducida adición de yeso, los cuales posteriormente amasados con agua, endurecen ya sea al aire o sumergidos en agua.¹

II) Cementos blancos.

Iguales a los cementos comunes con la diferencia que estos cuentan con determinada composición e índice de blancura.¹

III) Cementos de aluminato de calcio (CAC/R).

Se trata de cementos con alto contenido de aluminatos de calcio (cementos aluminosos), los cuales se caracterizan por alcanzar resistencias a temprana edad.¹

IV) Cementos expansivos.

Estos cementos tienen una gran cantidad de sulfatos y aluminatos en su composición, lo que genera que se expanda ligeramente durante el inicio del periodo de endurecimiento de tal forma, que compensa la retracción del volumen a causa de la contracción por secado.¹

V) Cementos de fraguado controlado.

En estos cementos lo que se busca es el control de fraguado a determinado tiempo, estos pudiendo ser lentos o acelerados.¹

VI) Cemento portland con una alta resistencia a sulfatos; cemento Ferrari.

Estos cementos contienen una menor cantidad de óxido de aluminio y una gran cantidad de óxido de hierro haciéndolos altamente resistentes a los ataques sulfáticos.¹

VII) Cemento supersulfatado.

Los cementos supersulfatados se basan en una mezcla de escoria de alto horno granulada, la cual es enfriada rápidamente y altamente vitrificada, en conjunto con cal viva calcinada pudiendo adquirir resistencias bastante importantes.¹

VIII) Cementos para pozos de petróleo.

¹ (Sanjuán & Chinchón, 2004) (Neville & Brooks, 2010)

Estos se utilizan para recubrir pozos de petróleo y fraguan y endurecen de forma gradual a altas presiones y temperaturas.¹

A continuación, se menciona una lista de distintos componentes, los cuales, al ser agregados en proporciones y dosificaciones determinadas, dan origen a la variedad de cementos mencionados anteriormente.

Escoria granulada de horno alto. (Propiedades hidráulicas)

Se obtiene por enfriamiento rápido de una escoria fundida la cual se obtiene por la fusión del mineral de hierro en un horno alto y está compuesta por dos tercios de escoria vítrea, la cual posee propiedades hidráulicas. Dicha escoria se debe activar para que endurezca hidráulicamente y su principal activador es el Clinker de cemento portland.¹

Puzolanas (P, Q). (formación de compuestos cristalinos)

La puzolana es otra adición que se puede incorporar en el cemento para mejorar sus propiedades ya que contribuye con la durabilidad de la masa al tiempo que protege al cemento de ataques químicos como aguas puras, carbónicas, agresivas o con débil acidez. Estos materiales puzolánicos son sustancias naturales de composición silícea, silico-aluminosa que a su vez le dan al cemento mayor compacidad e impermeabilidad, producen menor calor de hidratación además de contrarrestar los fenómenos de expansión producidas por la cal o magnesia libre.¹

Estas se utilizan especialmente en obras de grandes volúmenes como presas, cimentaciones masivas, muros de contención, obras marítimas, entre otras.¹

Para su correcta utilización, los materiales puzolánicos deben de procesarse adecuadamente, deben ser perfectamente seleccionados, homogenizados, secados y pulverizados. Existen principalmente tres tipos de puzolanas.¹

- a) Puzolana natural (P) - origen volcánico.
- b) Puzolana natural (P) en cementos resistentes a sulfatos (SR) y agua de mar (MR).
- c) Puzolana natural calcinada (Q) – de origen volcánico, arcillas, pizarras o rocas sedimentarias activadas por tratamiento térmico.

Cenizas volantes (V, W). (Propiedades puzolánicas e hidráulicas)

¹ (Sanjuán & Chinchón, 2004) (Neville & Brooks, 2010)

Las cenizas volantes se obtienen por medio de precipitación electrostática o mecánica de partículas arrastradas por los gases de carbón pulverizado en horno, estas pueden ser de naturaleza silícea o calcárea, las primeras cuentan con propiedades puzolánicas, y las segundas además de estas, también poseen propiedades hidráulicas. Las cenizas volantes se catalogan en tres clases.

- a) Cenizas volantes silíceas (V) – polvo fino con propiedades puzolánicas.
- b) Cenizas volantes silíceas (V) en cementos resistentes a sulfatos (SR) y agua de mar (MR).
- c) Cenizas volantes calcáreas (W) – polvo fino con propiedades hidráulicas o puzolánicas.¹

Esquisto calcinado (T). (Propiedades puzolánicas e hidráulicas)

El esquisto calcinado particularmente el bituminoso se produce en hornos especiales a altas temperaturas, en los cuales la energía liberada se utiliza para generar electricidad y la ceniza es molida para adición en el Clinker de cemento, ya que contiene componentes de la fase de este, como silicato bicalcico y aluminato monocálcico principalmente, a su vez, contiene componentes de oxido, especialmente dióxido de silicio el cual posee funciones puzolánicas. De tal forma que estos componentes en estado molido presentan propiedades tanto hidráulicas como puzolánicas.¹

Caliza (L, LL) (Relleno-reductor de agua)

Las calizas no cuentan con propiedades hidráulicas, sin embargo, estas funcionan como relleno en el cemento, mejorando sus propiedades físicas ya que distribuyen y saturan los espacios vacíos entre las mismas partículas, otorgando así una mayor rigidez y reduciendo la demanda de agua, que al final se reflejara en aumento de resistencias. Para la utilización de calizas es indispensable utilizar una mayor finura en el molido de clinker de cemento portland.¹

Humo de sílice (D). (Alta reactividad puzolánica)

El humo de sílice se compone de partículas esféricas muy finas las cuales suelen tener una alta reactividad puzolánica, de tal forma que además de utilizarse como componente principal de cemento, se emplean como adición en hormigones de altas resistencias. El humo de sílice se obtiene mediante la reducción de cuarzo de gran pureza con carbón, en hornos de arco eléctrico y reacciona con el hidróxido cálcico para formar hidratos de silicato cálcico.

Finalmente, el humo de sílice también es empleado en cementos resistentes a sulfatos (SR) y agua de mar (MR).¹

¹ (Sanjuán & Chinchón, 2004)

Los componentes mencionados anteriormente están clasificados de acuerdo con la norma ASTM¹ la cual los cataloga en 5 tipos, dependiendo de su uso y con un listado de características.

A continuación, se presenta una tabla a manera de resumen.

Tabla 2. Especificación de cementos por tipo según norma ASTM

Tipo	Descripción	Denominación	Características opcionales
I	Uso general	Cemento portland	1,5
II	Uso general; Calor de hidratación moderado y resistencia moderada a los sulfatos	Cemento portland con escoria	1,4,5
		Cemento portland con humo de sílice	
		Cemento portland con puzolana	
		Cemento portland con ceniza volante	
		Cemento portland con caliza	
		Cemento portland mixto	
III	Alta resistencia inicial	Cemento de horno alto	1,2,3,4
IV	Bajo calor de hidratación	Cemento puzolanico	5
V	Alta resistencia a los sulfatos	Cemento compuesto	5,6
Características opcionales 1) Aire incluido, IA, IIA, IIIA 2) Resistencia moderada a los sulfatos: C ₃ A máximo 8%. 3) Alta resistencia a los sulfatos: C ₃ A máximo 5% 4) Calor de hidratación moderado: Calor máximo 290 KJ/kg (70 cal/g) a los 7 días o la suma de C ₃ S y C ₃ A máximo 58%. 5) Álcali bajo: Máximo 0.60% expresado como Na ₂ O equivalente. 6) El límite de resistencia alternativa de sulfatos está basado en el ensayo de expansión de barras de mortero.			

Tabla 3. Porcentaje de compuesto de acuerdo con el tipo de cemento según norma ASTM

Tipo	% Compuesto químico						% Pérdida por calcinación	% Cal libre (CaO) libre
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	MgO	SO ₃		
I	55	19	10	7	2.8	1	1	1
II	51	24	6	11	2.9	0.8	0.8	1
III	57	19	10	7	3	1	1	1.6
IV	28	49	4	12	1.8	0.9	0.9	0.8
V	38	43	4	9	1.9	0.9	0.9	0.8

1.7 Estructura porosa.

Del proceso de hidratación surge un fenómeno denominado red porosa la cual estará ligada directamente a las características de resistencia a compresión y durabilidad de la masa y este va a depender de varios factores como la compactación, el tipo de cemento utilizado, el vibrado y curado, pero principalmente de la relación agua/cemento (A/C).²

¹ ASTM C150/C150M – 09 Especificación normalizada para cemento portland

² (López, 2012)

La porosidad es debido a que el agua y el cemento forman espacio dentro de la masa cuando esta está en estado plástico ya que al estar compuesto por arena, cemento y agua, los materiales más pesados tienden a asentarse en el fondo y los más livianos (agua y aire) a flotar a la superficie exterior, el inconveniente surge ya que no todas estas partículas de agua logran evaporarse mientras la mezcla está en estado líquido, si no hasta que esta está ya endurecido formando cavidades y conductos denominados redes porosas. De tal forma que si bien, a mayor dosificación de agua añadida, mejor será la manejabilidad de la masa, esto tendrá como efecto secundario un exceso de agua superior al necesario para hidratar al cemento, por lo tanto, será mayor la cantidad de agua que tenga que evaporarse a la superficie. ¹

Los problemas que se pueden acarrear gracias a la red porosa no están únicamente ligados a resistencias, sino que tienen un impacto a su durabilidad ya que estas son propensas a sufrir ataques químicos debido al ambiente, tales como ataques sulfáticos, problemas de carbonatación, entre otros, los cuales serán explicados más adelante. ¹

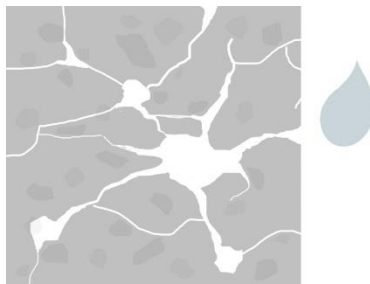


Figura 5 Diagrama estructura porosa

1.1.8 Estabilidad del volumen.

Reacciones expansivas.

- a) Aluminato tricálcico (C_3A) + yeso (SO_3) + agua (H_2O).

La reacción química entre el aluminato tricálcico, el yeso y los iones de sulfato en el agua crean sulfoaluminato de calcio el cual como se mencionó anteriormente sirven para regular el fraguado y que el C_3A no tenga una reacción de hidratación instantánea, dicha reacción entre el C_3A , el SO_3 y el H_2O puede causar fenómenos de expansión los cuales terminan cuando el yeso se consume completamente, el problema se crea ya sea en el momento de no haber suficiente cantidad de sulfato disponible haciéndose inestable, o cuando hay un alto contenido de yeso ya que dicho proceso de hidratación se retrasa hasta pasado el periodo de fraguado, Finalmente sucede lo mismo cuando hay una alta cantidad de C_3A . ²

¹ (López, 2012)

² (Triviño, 1974)

b) Cal libre (CaO) + Agua (H₂O).

El óxido de calcio conocido como cal libre se obtiene en la calcinación de la caliza en el proceso de fabricación del clinker, dicho componente reacciona inmediatamente al entrar en contacto con partículas de agua formando hidróxido de calcio Ca(OH)₂, de tal forma que pueden hidratarse total o parcialmente durante la conservación de Clinker al aire libre o en el momento que éste es mezclado con el yeso, el resultado de esta reacción es denominada cal apagada. Un exceso de CaO puede generar la existencia de cal libre sin hidratar posterior a la fabricación la cual una vez puesta en obra, al apagarse producirá expansión.¹

c) MgO+H₂O.

El magnesio siempre forma parte en el proceso de fabricación del Clinker ya que la materia prima (calizas) cuentan con una proporción de magnesio y este participa ya sea al momento de calcinación como en la formación de fases mineralógicas.

Por una parte, este componente sirve como estabilizador en todo el proceso, sin embargo, por otra parte, podrían provocar acciones expansivas ya que su hidratación es tan lenta que tienden a suceder meses después de su colocación en obra. De tal forma que es importante regular su contenido.

Las reacciones mencionadas anteriormente pueden causar fenómenos de expansión una vez endurecida la estructura, dando como resultado agrietamientos y fracturas las cuales como consecuencia generaran problemas de resistencia y durabilidad.²

1.1.9 Durabilidad.

Resistencia a ataques químicos.

La durabilidad en estructuras compuestas por cemento depende como se ha ido mencionando a través del texto, en varios factores asociados entre ellos, como lo es la composición del cemento, el proceso de construcción y los aspectos ambientales. sin embargo, existe una parte fundamental que son las características propias del cemento, ya que estas estarán ligadas a la resistencia que dicha estructura tendrá con el tiempo y los elementos externos. De tal forma que se pueden clasificar en dos categorías. Resistencia a sulfatos y reacción entre álcalis y agregados.

¹ (Calleja & del Olmo, 1971)

² (EIPPCB, 2011)

a) Resistencia a sulfatos.

Las partículas de cemento que son más vulnerables a ataques sulfáticos son el Óxido de calcio Ca(OH)_2 conocida como cal libre, el cual se mencionó en líneas anteriores con relación a reacciones expansivas. Por otro lado, otro componente que tiende a sufrir dichos ataques son los hidratos de Aluminato tricalcico (C_3A), los cuales reaccionan fácilmente con los iones de sulfato que penetran por los poros de la estructura, estos al reaccionar forman etringita la cual tiende a expandir y desintegrar gradualmente las capas superficiales del hormigón. De tal manera que en zonas que se está expuesto a agua de mar o agua residual, los contenidos de C_3A en el cemento empleado tienen que ser bajos.¹

b) Reacción entre álcalis y agregados.

La reacción se produce cuando algunos componentes álcalis (sodio y potasio) encontrados en las partículas de cemento sufren una reacción química con los componentes minerales silíceos o carbonatos reactivos encontrados en los áridos que componen el mortero. Dichas partículas al entrar en contacto con el agua que entra a través de los poros de la masa, forman un gel color blanco que, igual que con el C_3A tiende a sufrir expansión, creando así tensiones internas las cuales posteriormente se verán reflejadas en la desintegración del hormigón.¹

Todo esto estará en función del tamaño de las partículas de dichos componentes, el tiempo y la temperatura en la que se esté expuesto, ya que la reacción cesará cuando una de las partículas reactivas sea tan baja o disuelta completamente.¹

Para evitar todos estos problemas tanto de estabilidad como durabilidad por ataques químicos es fundamental tomar en cuenta cada uno de los puntos mencionados anteriormente como la relación agua-cemento, los tipos y clases resistentes de cemento, evitar pérdida de agua por evaporación, cuidar la temperatura ambiental, que el hormigón o mortero sea lo más compacto posible, entre otros, de tal forma que para obtener estos resultados una manera de reforzar los componentes es la utilización de aditivos añadidos en el amasado.¹

¹ (Ludwig, 1972)

II. ADITIVOS.

1.2.1 Tipos de aditivos.

Los aditivos son componentes que se añaden al hormigón o al mortero en pequeñas proporciones para modificar sus propiedades físicas y químicas originales, estas varían y están en función del uso que se pretenda dar al material. Estos pueden ser de forma líquida, en polvo o en pasta, la dosificación dependerá del tipo de aditivo y las características que se quieran obtener.

Entre los más importantes encontramos los siguientes.¹

- I) Colorante - Se utilizan en acabados vistos y sirven para darle color a la mezcla.
- a) Anticongelante - Mejora el fraguado del hormigón en condiciones de bajas temperaturas.
- b) Resina - Plastifica e impermeabiliza la mezcla.
- c) Endurecedor de superficie - Se utiliza para dar una terminación lisa que al mismo tiempo repele la suciedad y el polvo.
- d) Hidrofugo e impermeabilizante - Disminuyen la absorción capilar, evitando que el agua penetre, están diseñados especialmente para revestimientos que estén expuestos al agua.
- e) Plastificante – Aportan a la masa una consistencia plástica más elevada sin la necesidad de añadir más agua, por lo contrario, hacen que esta se reduzca.
- f) Acelerador de fraguado – Permiten el fraguado y la obtención de resistencia en menor tiempo, agilizando así, el proceso constructivo.
- g) Retardador de fraguado – Mantienen continua la hidratación del cemento permitiendo un mayor lapso de tiempo para ser vertido.
- h) Aireantes – agregan micro burbujas de aire en el hormigón las cuales en temperaturas bajas absorben la expansión del hielo evitando fisuras. A su vez, estas aportan mejoras de aislamiento térmico y acústico.
- i) Inhibidores de corrosión – como su nombre lo dice, estos aditivos minimizan la corrosión de las barras de acero embebido en el hormigón.

Del listado mencionado anteriormente, se encuentran también los aditivos superplastificantes y de anti retracción, los cuales, al ser el punto de estudio de esta práctica, se abordarán con más profundidad.

¹ (Trujillo, 2011)

1.2.2 Aditivos superplastificantes.

Los aditivos superplastificantes se utilizan una vez los plastificantes comunes llegan a su máxima capacidad y se emplean especialmente para concretos de altos asentamientos o altas prestaciones. Su principal función es aumentar la manejabilidad de la mezcla, lo cual da como resultado una reducción tanto de agua como de cemento, al mismo tiempo que mejora sus resistencias.¹

Los superplastificantes se componen de moléculas orgánicas e inorgánicas que ejercen una expulsión electrostática inducida entre las partículas de cemento dispersándolas y liberando el agua retenida entre sus granos.²

Durante décadas los más comunes eran los compuestos a base de lignosulfonatos modificados, sulfonas de polimelanina y los sulfonatos de polinaftaleno

En la actualidad la última generación de aditivos superplastificantes están compuestos por los denominados PCE (Policarboxilatos) los cuales tienen bajo contenido de cloruros y álcalis, estos pueden llegar a reducir de un 25 a un 50% en cantidad de agua mientras que aumenta el módulo de elasticidad de la masa y reduce las posibilidades de ataques químicos, al mismo tiempo que reducen la contracción por secado.²

Experimentos han determinado que cuando la relación agua-cemento es menor a 0.40 es prácticamente imposible obtener una mezcla con un asentamiento mayor a 100mm Figura 6. pero a su vez, también se muestra que cuando es añadido superplastificante, es posible obtener mezcla de agua/aglutinante de .30 con asentamiento de hasta 200mm Figura 7.²

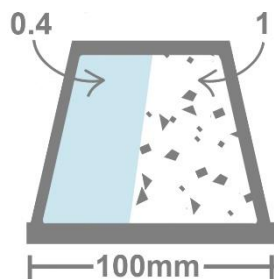


Figura 6. Asentamiento 0.4 relación agua-cemento.²

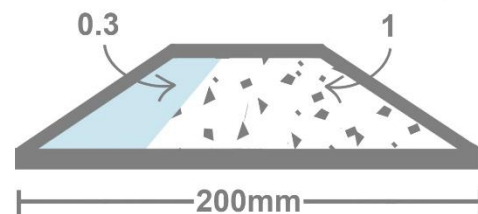


Figura 7. Asentamiento 0.3 relación agua-cemento.²

Para comprender este fenómeno, es importante saber que la molienda del clinker y del yeso desarrollan una gran cantidad de cargas electrostáticas en las partículas del cemento, especialmente

¹ (Donza & Trezza)

² (Aïtcin, 2008)

cargas negativas en las partículas de C_3A y C_4AF , cuando estas partículas entran en contacto con un componente polar como el agua, estos poseen una gran tendencia a adherirse.¹

Experimentos (Jolicoeur, Perreault, Bossányi, & Piotte, 1995) determinan que los superplastificantes disgregan estas partículas de cemento inclusive mejor que cualquier aditivo reductor de agua. Esto se debe a que algunas moléculas orgánicas reducen altamente o destruyen este proceso de adherencia de dichas partículas de tal forma que toda el agua introducida durante la mezcla de hormigonado puede eficientemente ser utilizado únicamente para dar manejabilidad al amasado.¹

Esta interacción entre las partículas de cemento y las moléculas orgánicas del superplastificante depende principalmente de la composición físico-química de las partículas del mismo cemento y a su vez de la composición de las moléculas de dispersión del aditivo superplastificante a utilizar.¹

Por otra parte, la interacción de las moléculas de polisulfonatos (principal componente del superplastificante) con las partículas de cemento no es solo física, ya que moléculas del grupo de sulfonatos pueden reaccionar con partículas activas de C_3A si el cemento no es capaz de liberar iones de SO_4^{2-} lo suficientemente rápido.¹

Según el artículo de C. Jolicoeur, se expresa que el efecto de las moléculas de superplastificante se pueden descomponer en 3 partes:

- 1) Adsorción de superficie: atracción de las moléculas de superplastificante con la superficie de la partícula de cemento que previene que reaccione con el agua. Figura 8.

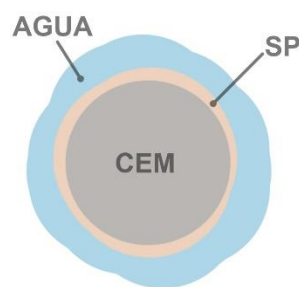


Figura 8. Diagrama adsorción física

- 2) Repulsión electrostática: Fuerzas de repulsión a distancia entre las moléculas de cemento, debido a la reconfiguración de cargas en su superficie. Figura 9.

¹ (Aïtcin, 2008) (Jolicoeur, Perreault, Bossányi, & Piotte, 1995)

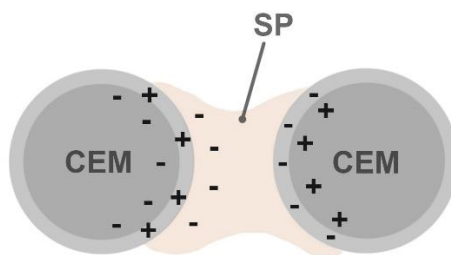


Figura 9. Diagrama repulsión electrostática entre dos partículas

- 3) Repulsión estérica: dos partículas de cemento que en ausencia de superplastificante se atraían y formarían un fólculo, mientras que en presencia de superplastificante se cargan y rechazan. Figura 10.¹

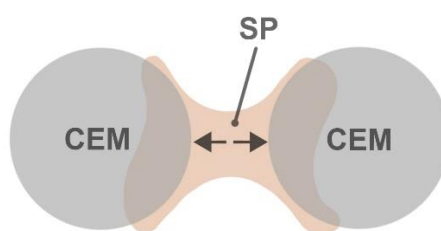


Figura 10. Diagrama repulsión estérica entre dos partículas

Es de gran importancia mencionar que debido a ciertas interacciones entre los principales componentes del cemento y del superplastificante, que en algunos casos la mejora en la viscosidad es de corta duración ya que una porción de las moléculas de superplastificante reaccionan químicamente en la fase inicial y estas ya no están disponibles posteriormente para el proceso de dispersión de las partículas de cemento. Es decir debido a que el superplastificante mueve una gran cantidad de flujo de calor, al encontrarse en cantidades reducidas el pico de calor se llevara a cabo más rápido que en el proceso normal de hidratación agua-cemento y lo contrario, si la cantidad de superplastificante es elevada, esta aceleración desaparece ya que la adsorción de moléculas de superplastificante en la superficie de cemento previene la reacción con el agua, Esto demuestra que como se mencionó anteriormente, la reacción de las moléculas de superplastificante no es simplemente física, sino que también existen simultáneamente reacciones químicas.¹

En la actualidad existen diversos tipos de superplastificantes entre ellos se encuentran principalmente los lignosulfonatos modificados (MLS), naftalenos sulfatado formaldehído (SNF), melamina sulfatada formaldehído (SMF) y los más actuales, los policarboxilatos (PCE).²

¹ (Jolicoeur, Perreault, Bossányi, & Pottie, 1995)

² (Donza & Trezza)

Lignosulfonatos.

Considerados la primera generación de aditivos plastificantes, los lignosulfonatos durante años fueron los únicos agentes de dispersión utilizados en la industria y estos podían reducir del 5 al 8% del agua de amasado, al mismo tiempo que su costo era considerablemente bajo.¹

La materia prima de los lignosulfonatos se obtiene de la fabricación de papel mediante la producción de pulpa de celulosa y suelen acarrear dos tipos de problemas, la producción de compuestos activos superficiales, los cuales crean una inclusión de aire en el proceso de mezclado y un alto contenido de azúcares causantes de efectos de fraguado retardado.¹

Debido a estos problemas el contenido de lignosulfonatos tiene que ser reducido a una dosis aproximada de 1 a 1.5 litros por m³ de hormigón. Mientras utilizando sulfonatos de naftaleno se pueden obtener cantidades de 10 a 15 litros.¹

Los lignosulfonatos se consideran como superplastificantes cuando estos cuentan con una cantidad reducida de agentes superficiales activos y azúcares.¹

Para mejorar sus propiedades, a algunos lignosulfonatos se les pueden agregar SNF y SMF para incrementar su eficiencia, al mismo tiempo que se le puede añadir cierto porcentaje de PCE, que sirve para dotarlo de plasticidad y retardar el fraguado y son llamados polifuncionales. Sin embargo, dichas adiciones pueden incrementar su costo.¹

Sulfonatos de naftaleno y melanina.¹

Catalogados como la segunda generación de superplastificantes los sulfonatos de naftaleno y melanina eran los tipos de aditivos más usados en la actualidad, antes de la llegada de los policarboxilatos.¹

Estos a diferencia de los lignosulfonatos, no afectan la presión superficial así que no generaran oclusión de aire en la mezcla.¹

Por otra parte, pueden llegar a tener una reducción de agua de 25%, obteniendo una relación agua/cemento de entre 0.4 a 0.65. A pesar de tener propiedades similares, existen ciertas ventajas en cuanto a desempeño entre los sulfonatos de melanina con los de naftaleno.¹

Las ventajas de los de melanina son que no retardan la hidratación del cemento tanto como los de naftaleno y al tener un contenido menor del 22% de sólidos a diferencia de los 40-42% de los de naftaleno, una sobredosis no crearía una situación crítica, al mismo tiempo que no arrastran tanto

¹ (Aïtcin, 2008) (Valverde, Serrano, & Domínguez, 2016) (Jolicoeur, Perreault, Bossányi, & Piotte, 1995)

aire, de tal forma que es más sencillo obtener un sistema estable de burbujas de aire. Finalmente dan una mejor consistencia y no les dan tono beige claro a los hormigones de cemento blanco.¹

1.2.5 Policarboxilato.

Estos son los aditivos más modernos y eficientes de los polímeros, los cuales contienen una estructura molecular más compleja que los anteriores y funcionan principalmente por repulsión estérica más que por un principio electrostático, como podemos ver en la Figura 10. En páginas anteriores.¹

Los superplastificantes compuestos por policarboxilato son más eficientes ya que la dosificación necesaria para alcanzar el punto de saturación es de dos a tres veces menor que la dosis de los compuestos anteriores, es decir 0.28 a 0.65 de relación agua/cemento, pudiendo así reducir hasta un 40% de agua.¹

Por otra parte, cuentan con características moleculares que los dotan de propiedades específicas, dependiendo de la aplicación del material al que se vayan a emplear ya que son capaces de variar considerablemente la manejabilidad del hormigón.¹

Sin embargo, estas características pueden jugar en su contra ya que dichas variaciones de manejabilidad son tan amplias en una gama de dosificación tan reducida, que la simple humedad encontrada en los áridos a utilizar puede ocasionar una descomposición en la mezcla.¹

La optimización de estos productos está a su vez, en función del tipo de cemento que se vaya a utilizar, ya que por ejemplo cementos de alto contenido de C_3A en combinación con los superplastificante de policarboxilatos, en general tienen mayor plasticidad, sin embargo, mantienen menos manejabilidad, estas características y las mencionadas en el párrafo anterior, lo pueden limitar a ser utilizados únicamente para materiales prefabricados.¹

1.2.3 Aditivos reductores de retracción.

Retracción, conceptos generales.

Se conoce como retracción al fenómeno por el cual un conglomerante hidráulico, disminuye su volumen al momento de fraguado y endurecimiento, debido principalmente a los cambios térmicos producidos durante el proceso de reacción de hidratación y la evaporación del agua excedente en la mezcla.²

¹ (Aïtcin, 2008) (Valverde, Serrano, & Domínguez, 2016) (Jolicoeur, Perreault, Bossányi, & Pottie, 1995)

² (Kenny, Aditivos reductores de retracción, 2004)

La pasta de cemento experimenta variaciones volumétricas debido a reacciones que ocurren en su interior tanto en estado plástico como, a menor grado, en estado endurecido y los factores que más influyen para la existencia de dichos fenómenos son las temperaturas ambientales extremas y la misma composición de los agregados.¹

Retracción plástica.

La primera contracción que sufre el hormigón se conoce como retracción plástica y es debido a la evaporación del agua superficial del material. Si esta evaporación es mayor a la velocidad de exudación, la superficie del hormigón se seca y provoca la formación de meniscos de agua en su interior, estos meniscos de agua se forman en las paredes de los espacios porosos del material y la misma tensión superficial que tiene el agua atrae las paredes causando una contracción entre ellas. La retracción plástica se lleva a cabo entre las primeras dos horas del hormigonado Figura 11.¹

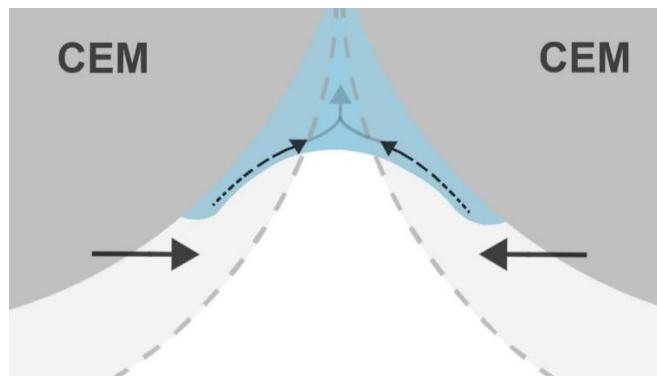


Figura 11. Diagrama contracción de paredes debido a tensión superficial del agua

Uno de los principales problemas de la retracción plástica es la formación de fisuras en la cara exterior del material, estos problemas se generan ya que, como se mencionó anteriormente, la superficie exterior del material se seca antes que las superficies internas, sin embargo, esta no es lo suficientemente resistente para soportar las tensiones generadas por dichas superficies internas y se agrieta. Figura 11.¹

Estas fisuras a pesar de no generar problemas estructurales pueden acarrear problemas como, cambios en las características geométricas del material (Deformaciones), a la vez que sirven como conductos para futuros ataques químicos.¹

Retracción por secado.

¹ (Kenny, Aditivos Reductores de retracción, 2004)

La retracción por secado se puede producir a una edad del material avanzada y es provocada por la pérdida de humedad de la pasta de cemento ya que esta, al estar humedecida se encuentra expandida, cuando pierde humedad se contrae. Por sí misma la pasta de cemento puede sufrir contracciones hasta de un 1%, los áridos agregados juegan un papel fundamental en este tema, ya que por su resistencia no permiten tanta contracción, de tal manera que servirán como controladores de la retracción y estos podrán mejorar o no, dependiendo de su volumen y dureza. Los resultados de dicha retracción por secado se verán reflejados tanto en fisuras que con el tiempo podrán penetrar profundamente el interior del hormigón, como en deformaciones del material, sobre todo cuando estos son de dimensiones considerables o espesores reducidos.¹

La magnitud de las tensiones por los cambios de volumen se deriva de varios factores, como el grado de restricción, el módulo de elasticidad y la capacidad de fluencia, por su parte la magnitud de retracción por secado dependerá de la cantidad, el tipo y el tamaño de los agregados y el contenido de agua de la mezcla. Así pues, a mayor cantidad y rigidez de agregados menor será la retracción, por ejemplo, la retracción de un hormigón que contiene arenisca puede ser más del doble que la de un hormigón que contiene granito, basalto o caliza.²

Para reducir estos problemas los fabricantes suelen emplear dos métodos, utilizando aditivos expansores para compensar estas deformaciones y aditivos reductores de retracción (ARR), este último altera el mecanismo básico sin añadir ningún material expansivo.²

Tensiones de origen térmico.

Existen también tensiones de origen térmico que pueden ocasionar tanto fisuras como deformaciones en la estructura, esto es debido a la expansión (calor) o contracción (frio) causada por los cambios de temperatura ya sea interna, en partes de la estructura que pierden calor al hidratarse a diferentes velocidades, como la temperatura exterior ya que si los cambios son muy bruscos la superficie exterior del material puede aumentar o disminuir a diferencia de la temperatura interior de este, causando así tensiones de tracción en la superficie donde estas temperaturas se juntan. Las tensiones de tracción estarán en función del diferencial de temperatura, el coeficiente de expansión térmica, el módulo de elasticidad del material y el grado de restricción.²

Alabeo en losas planas.

El problema en materiales planos de perfiles reducidos tales como losas de pisos o recubrimientos, son los alabeos, esto se debe a que la superficie externa de las piezas se seca antes sufriendo

¹ (Barlow, 1990)

² (Carlson, 1938)

fenómenos de retracción, mientras que las superficies internas siguen saturadas, de tal forma que dicha diferencia crea los mismos problemas de tracción entre estas superficies, tal como se vio en los párrafos anteriores, dichas losas responden a estas diferencias curvándose hacia arriba en la parte de los cantos. Esto también se debe a que los hormigones con mayores resistencias, generalmente se retraen y estos poseen un módulo de elasticidad más elevado, de tal manera que entre mayor sea el valor del módulo de elasticidad, este será más propenso a sufrir fenómenos de alabeo. Por su parte, el alabeo de las losas esta principalmente relacionado a una exudación y un curado pobre.¹

Para reducir estos fenómenos existen las adiciones de reducción de retracción los cuales logran que las losas reduzcan esta curvatura, ya que las superficies externas sufren menor retracción cuando se secan, a su vez que modifican la forma en la que el agua se expulsa a través del hormigón, dando una superficie de humedad mucho más uniforme.¹

Para determinar dichos fenómenos que conlleva la retracción, actualmente no existen pruebas de cuantificación exacta ya que los ensayos de laboratorio utilizan probetas de tamaños reducidos.

1.2.4 Aditivos reductores de retracción.

Los aditivos reductores de retracción fueron diseñados en Japón a finales de los años noventa. Están planteados para surgir reacciones dentro del material en el momento de hidratación evitando que la pasta de cemento se contraiga. Estos aditivos están pensados para tener efectos en la propiedad física actuando en el espacio interior del líquido de la pasta, reduciendo así, tensiones superficiales, al mismo tiempo que trabaja en el cuerpo general de la masa para evitar su disminución de volumen. La acción de estos aditivos se lleva a cabo tanto en estado fresco como en estado endurecido.²

Las retracciones por secado del hormigón pueden llegar a tener valores de retracción de 1.5mm/m y 2mm/m, las cuales son las principales causantes de fisuración y pérdida de geometría del material. Para evitar esto, es indispensable la utilización de dichos aditivos.²

La dosificación de estos aditivos puede variar entre un 1 y un 2.5% y sus aplicaciones principales son en pavimentos, prefabricados y mobiliario urbano.²

El aditivo reductor de retracción no altera el coeficiente de expansión térmica, sin embargo, modifica la cantidad de calor que se genera debido al proceso de hidratación.²

¹ (Kenny, Aditivos reductores de retracción, 2004) (Carlson, 1938)

² (Mora, Aguado, & Gettu, Influencia de los aditivos reductores de retracción sobre la retracción plástica, 2013)

Según resultados experimentales de aditivos reductores de retracción, su optimización y desempeño se verán afectados de acuerdo a los factores mencionados anteriormente respecto a la composición del cemento, en cuanto a su relación agua/cemento ya que una menor cantidad de agua produce una disminución en la retracción, a su vez la granulometría y rigidez de sus áridos, ya que un mayor tamaño y rigidez reducen también dicho efecto, por otra parte otros factores son, la finura y el tipo de cemento debido a que no todos los cementos son compatibles y se comportan igual con los distintos aditivos y por último los agentes ambientales.¹

Finalmente, un factor fundamental es el curado ya que este juega un papel esencial, sobre todo en los días iniciales ya que dicho experimento muestra que llevando un proceso de curado o no, los valores de retracción final son similares, sin embargo, los que, si llevaron dicho proceso, sufrieron menores retracciones durante los primeros 14 días, esto puede ser un factor muy importante ya que, como se mencionó en el apartado de retracción plástica en los primeros periodos de secado es cuando más se pueden sufrir problemas de tensiones y deformaciones.¹

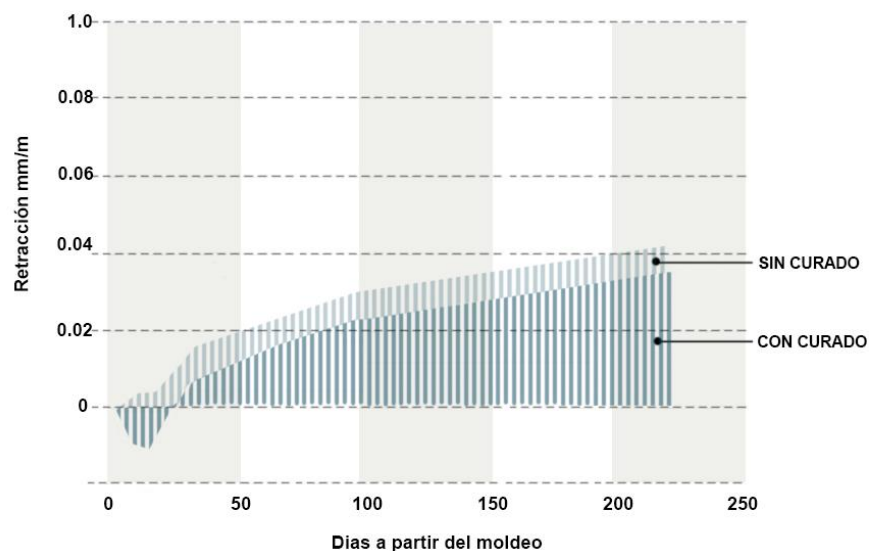


Figura 12. Grafica relación retracción con y sin curado a través del tiempo

¹ (Kenny, Aditivos reductores de retracción, 2004) (Mora, Aguado, & Gettu, Influencia de los aditivos reductores de retracción sobre la retracción plástica, 2013)

1.2.5 Hormigones arquitectónicos autocompactantes de altas prestaciones (HAC)

El hormigón arquitectónico autocompactante de altas prestaciones es aquel que, a través de la utilización de ciertos aditivos superplastificantes, dotan de cualidades físicas y mecánicas que mejoran el desempeño del material tanto en el proceso de fabricación como el comportamiento que este tendrá a lo largo del tiempo.¹

El emplear dichos tipos de aditivos brinda a la mezcla propiedades autocompactantes sin tener que llevar a cabo la utilización de procesos de vibrado o cualquier otro método de compactación, de tal forma que puede tener un discurrimiento ideal al momento de ser vertido en el encofrado, pudiendo llegar a cualquier resquicio de la armadura, esto mismo lo hace ideal para ser utilizado en moldes de secciones reducidas para materiales prefabricados, manteniendo siempre optimas propiedades de homogeneidad y estabilidad sin sufrir segregaciones. En otras palabras, mantiene la mezcla fluida y viscosa.²

Es por esto, por lo que este tipo de materiales (HAC) es considerado entre las categorías de los hormigones de altas prestaciones (UHPC) debido a sus características de durabilidad y resistencias adquiridas, estas relacionadas a la autocompactación al momento de fraguado.¹

Entre las principales características de los HAC encontramos las siguientes:

- Facilidad de colocación y exclusión de la utilización de métodos y equipos de compactación.
- Mejora la calidad del acabado superficial del material mientras que aumenta su uniformidad.
- Reduce la cantidad de agua del amasado, dando como resultado un aumento de resistencias mecánicas y una entrada en servicio de las estructuras en menor tiempo.
- Al ser un material más uniforme reduce el porcentaje de porosidad el cual, como sabemos, esto tendrá impacto en la durabilidad del material ya que es menos permeable reduciendo la velocidad de difusión de agentes agresivos.³

¹ (EFNARC, 2006) (Luzardo & Santana, 2005)

² (EFNARC, 2006)

³ (Burón, Fernandéz, & Garrido, 2006)

Existen varias clases en función del resultado de los ensayos característicos que corresponden al escurrimiento, viscosidad y resistencia de bloqueo (UNE 83361:2007)¹, (UNE 83362)², (UNE-EN 12350-9:2011)³, (UNE-EN 12350-10:2011)⁴ (UNE-EN 12350-11:2010)⁵.

Hoy en día este tipo de materiales es tan novedoso que se sigue en proceso de encontrar mejoras en su procedimiento de fabricación y componentes a utilizar para su optimización, especialmente el empleo de estos materiales para prefabricados, de tal manera que la normativa respecto a la producción y construcción no se refieren específicamente a este tipo, de tal forma que, para esto, hay que encontrar similitudes en los procesos existentes para tomarlos como referencia.

¹ UNE 83361:2007 *Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez. Ensayo del escurrimiento*

² UNE 83362. *Escurrecimiento con anillo J*

³ UNE-EN 12350-9:2011, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V*

⁴ UNE-EN 12350-10:2011, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 10: Hormigón autocompactante. Método de la caja en L*

⁵ UNE-EN 12350-11:2010, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 11: Hormigón autocompactante. Ensayo de segregación por tamiz*

CAPITULO 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la práctica, se decidió utilizar una dosificación base proporcionada por la empresa MC Spain, la cual es la que utilizan los fabricantes de este tipo de materiales prefabricados, los formatos estándar en el mercado de dichos prefabricados vienen en paneles de 1.2m x 1.2m, 1.2m x 2.4m y 1.2m x 3.6m con espesores que van de 1.5cm a 2.0cm.

Este tipo de hormigones con esas geometrías necesitan la utilización de aditivos superplastificantes tanto para adquirir una elevada fluidez al momento de su colocación en molde, como para la reducción de proporción agua-cemento para adquirir mayores resistencias, al mismo tiempo que su contenido de cemento tiene que ser elevado, de tal forma que el material puede llegar a presentar fenómenos de retracción que hagan que las piezas se doblen, comben y en general pierdan su geometría.

Así pues, se buscará valorar la incorporación de aditivos reductores de retracción a diferentes dosificaciones para minimizar dichos fenómenos.

Para desarrollar este proceso, se pretende utilizar las condiciones ambientales, de producción y almacenaje de los mismos fabricantes de este tipo de elemento prefabricados.

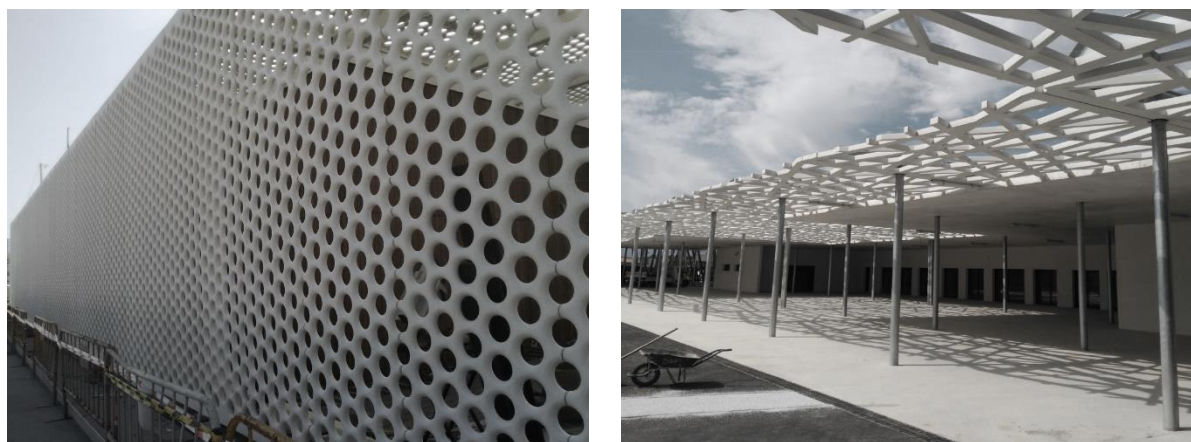


Figura 13. Ejemplos fachadas de hormigón arquitectónico autocompactante (material proporcionado por MC Spain)

I. MATERIALES.

Para llevar a cabo la práctica se tomó una dosificación patrón y se utilizaron materiales cuyas características de idoneidad son aprobados por las normas UNE-EN 13369:2004 ***Reglas comunes para productos prefabricados de hormigón***, apartado 4.2, la norma UNE-EN 206-9013 ***Hormigón parte 9. requisitos adicionales para el hormigón autocompactante*** y la norma de la institución Española EHE-08, ***Instrucción de hormigón estructural***.

A pesar de que actualmente no existe una normativa exacta y estas tres normas anteriores se enfocan particularmente a hormigones con áridos gruesos, se buscó tomar las referencias de estas y adecuarlas lo mejor posible al tipo de practica que a continuación se va a desarrollar.

Cemento.

Se utilizará un cemento blanco Cemex de clase 52.5 con características resistentes y composición química de acuerdo con las normativas UNE-EN 197-:2011¹. UNE-EN 80305:2012². UNE-EN 196-2: 2014³.

Áridos.

Como áridos se emplearán dos distintas granulometrías de arena de sílice, de 0.9 y de 1.5 las cuales cumplen el tamaño incluido en la tabla 1 de la Norma UNE-EN 480-13:2015 ⁴

Agua de amasado.

Como agua de amasado se utilizará agua destilada para las muestras de ensayo de referencia, mientras que para los amasados con aditivo se utilizará agua del grifo.

Aditivos.

a) Aditivo Superplastificante.

Se probarán tres distintos aditivos superplastificantes en base PCE, los cuales contarán con un PH entre 5-7 y una densidad de 1.05 a 1 g/cc. Estos serán llamados en esta práctica como SP1, SP2 Y SP3. La variación entre estos es que el primero cuenta con un 18% de residuos secos mientras que el 2 y el 3 con un 20% y 28% respectivamente. Estos materiales cuentan con los requisitos que indica la norma UNE-EN 934-2:2010⁵.y el artículo 29 del Anejo 17 de la EHE-08⁶.

b) Aditivo reductor de retracción.

como reductor de retracción se utilizara un aditivo en base a polialcohol el cual cumple con las características de la norma UNE-EN 934-2:2010.⁵

¹ UNE-EN 197-:2011. *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.*

² UNE-EN 80305:2012. *Cementos blancos*

³ UNE-EN 196-2: 2014. *Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos.*

⁴ UNE-EN 480-13:2015 *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Métodos de ensayo Parte 13: Mortero de referencia para albañilería para ensayos de aditivos para morteros.*

⁵ UNE-EN 934-2:2010 *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.*

⁶ EHE-08. *Instrucción de hormigón estructural.*

II. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Numero de ensayos.

En cuanto al número de ensayos, este estará definido por los 5 porcentajes distintos de aditivo reductor de retracción en combinación con los 3 diferentes superplastificantes los cuales llamaremos SP.

A continuación, se presenta un cuadro a manera de resumen de los 15 distintos amasados que se llevaran a cabo más un amasado de referencia sin ningún tipo de aditivo (A REF).

Tabla 4. Cantidad de amasados a realizar.

Amasado	Reductor de retracción				
SP1	0%	1%	2%	3%	6%
SP2	0%	1%	2%	3%	6%
SP3	0%	1%	2%	3%	6%
A REF	0%	-	-	-	-

El volumen total de la masa esta por convenir en función de los ensayos y las dimensiones de las piezas a realizar, esto dependerá a su vez del equipo, la cantidad de moldes y el espacio en el laboratorio de la EPSEB, al mismo tiempo se pretende llevar a cabo el almacenaje de las muestras a probar, con las mismas características ambientales utilizadas por los fabricantes de dichas losetas, esto es, temperatura ambiente sin la utilización de cámara húmeda.

Mortero de referencia.

Se amasará un mortero de referencia el cual servirá como elemento de comparación con los distintos amasados prueba para comparar resultados. Su composición se basará en la misma que estos, únicamente sin agregar ningún tipo de aditivo y variando el agua a llegar a consistencia según la normativa UNE-EN_83258¹.

Para comparar los resultados, se tiene contemplado utilizar tres distintos tipos de pruebas para evaluar cada uno de los 15 amasados; Rotura, retracción y deformación. A su vez como complemento, se pretende realizar dos pruebas no destructivas para determinar la porosidad y el módulo de elasticidad.

¹ UNE-EN_83258 Aditivos para hormigones morteros y pastas determinación de la consistencia por medio de la mesa de sacudidas

- I. Rotura: Se utilizarán 9 probetas por amasado en moldes de 4x4x16cm las cuales serán sometidas a pruebas de flexión y compresión a tres edades distintas 1, 7 y 28 días, tres probetas por cada día.
- II. Retracción: para medir la retracción se utilizarán 3 probetas de 2x2x28.5cm que serán medidas diariamente durante 28 días.
- III. Deformación: finalmente se fabricarán losetas de mayores dimensiones 75x45x1.5 los cuales posteriormente serán apilados entre si de forma vertical para medir las deformaciones que van sufriendo con el paso del tiempo.
- IV. Porosidad: Para medir la porosidad de cada amasado, se utilizará un trozo de probeta ensayada previamente a compresión a la edad de 28 días y se llevaran a cabo 3 distintas pruebas de medición, peso seco, peso saturado y peso hidrostático.
- V. Módulo de elasticidad: Se utilizarán las mismas probetas de 4x4x16 las cuales serán probadas a los 28 días, utilizando un artefacto que mide la frecuencia de sonido que producen dicha probeta al ser impactada con un martillo de madera.

III. DOSIFICACIONES.

En cuanto a la dosificación por amasado, como se mencionó anteriormente, la dosificación base sera la misma que utilizan los fabricantes. Asi pues, el contenido de cemento será del 38%, de áridos 39% de arena de 1.5mm y 16% de arena de 0.9mm, en cuanto al agua se partirá de una cantidad del 7% y esta ira variando de acuerdo a la manejabilidad requerida. todos estos respecto al peso total de la mezcla.

Por su parte para los 3 distintos aditivos superplastificantes, se pretende buscar el porcentaje ideal sobre el peso del cemento el cual sirva para utilizar la menor cantidad de agua posible y que a su vez, su manejabilidad sea la más conveniente para su puesta en molde.

Finalmente, el aditivo reductor de retracción ira en cantidades de 0%, 1%, 2%, 3% y 6%, de igual forma respecto al peso de cemento, cambiara entre cada prueba y será quien determine el número de amasados que se llevaran a cabo con relación a cada uno de los tres superplastificantes.

En cuanto al volumen total por amasado se estimó utilizar un peso de 25kg el cual corresponde al peso necesario para dar abasto tanto a las probetas como a los moldes.

Así pues, el porcentaje y peso por componente añadido a cada amasado se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5. Porcentaje composición de mezcla

Cemento	38%	9.5 kg
Arena 1.5	39%	11.7 kg
Arena 0.9	16%	4.8 kg
Agua	7 - 11%	Por definir
Superplastificante	Por definir	
Reductor retracción	0% - 1% - 2% - 3% - 6%	0 – 95 – 190 – 285 - 570 g

IV. EQUIPOS DE LABORATORIO

Para fabricar los amasados y llevar a cabo las pruebas descritas en el apartado anterior, se procuró buscar el equipamiento más óptimo con el que se cuenta en el laboratorio de materiales de la facultad y que estos a su vez cumplan con los lineamientos que indica la distinta normativa en cuanto a dimensiones y características de las probetas, entre ellas la norma UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007¹, UNE 80-101-88.², UNE-EN 196-1:2005.³ UNE-EN 1015-3.⁴

Hormigonera.

Dado a la cantidad de material que se va a llevar por mezcla se decidió sustituir el amasado manual utilizando una hormigonera eléctrica móvil.



Figura 14 Proceso de hormigonado

Mesa de sacudidas:

La mesa de sacudidas determinara la consistencia y plasticidad de la mezcla mediante la medida de esparcimiento sobre una mesa circular, sostenida por una base de acero y una manivela que la eleva y la dejar caer a una altura de 10mm. A su vez se utiliza un molde tronconico de bronce con un diámetro de 100mm en la base y 70mm en la parte superior. Basado en la norma UNE-EN 1015-3.⁴



Figura 15. Mesa de sacudidas.

¹ UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido

² UNE 80-101-88: método de ensayo de cementos: determinación de resistencias mecánicas

³ UNE-EN 196-1:2005. Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias mecánicas

⁴ UNE-EN_1015-3 Metodos de ensayo de los morteros para albañilería, parte 3: Determinacion de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)

Molde probetas 4x4x16cm

Siguiendo las recomendaciones de la norma UNE 80-101-88. para las pruebas de rotura a flexión y compresión se utilizarán probetas de acero mecanizado y rectificado desmontable.



Figura 16. Molde probetas 4x4x16cm

Molde probetas 2x2x28.5cm

Para medir la retracción, se contempla utilizar un molde de acero rectificado para probetas de 2x2x28.5cm el cual permite dejar embebido unas piezas de tope de acero inoxidable las cuales posteriormente servirán como apoyos conectores en el equipo de medición, en base a la norma UNE 83318:1994.¹



Figura 17. Molde probetas 2x2x28.5cm

Equipo medición de retracción

La retracción será evaluada en un aparato de soporte mediante dos pilares verticales el cual mide la variación de longitud axial del mortero a través del tiempo. Este efectúa lecturas mediante un cronometro con una aproximación de 0.001mm. UNE 83318:1994.



Figura 18. Equipo para medición de retracción

Molde 75x45x madera MDF.

Para las pruebas de deformación de losetas, se fabricarán moldes con base de plástico PVC montado sobre una lámina de madera MDF, a su vez se atornillarán listones de madera de 2cm para formar las paredes de contención de la mezcla.



Figura 19. Moldes 75x45x2cm para losetas

¹ UNE 83318:1994 Ensayos de hormigón. Determinación de los cambios de longitud

Equipo medición rotura

a) Flexión.

Para realizar las pruebas de rotura a flexión se utilizara un dispositivo para muestras de probetas de 4x4x16cm adecuado para funcionar con una maquina Wykeham Farrance de 5 toneladas de capacidad maxima y una precision establecida de 1 kilo, determinados por la norma UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007.¹



Figura 20. Equipo de medición rotura a flexión

b) Compresión.

Por su parte las pruebas de rotura a compresión se llevarán a cabo en un dispositivo para muestras de mortero de 4x4cm, el cual debido a su alta resistencia estará adaptado a una máquina Suzpecar de 200 toneladas de capacidad máxima, con precisión del módulo establecido a 100 kilos... determinado por la norma UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007.¹



Figura 21. Equipo de medición rotura a compresión

Medicion de porosidad.

En cuanto a la medicion de porocidad, para el peso seco se utilizara un horno para deshumedecer las probetas. Posteriormente para la prueba de peso saturado se utilizara un tanque de vacio conectado a un recipiente con agua, que por medio de una bomba absorbe el aire del tanque al vacio, para posteriormente introducir gradualmente el agua del contenedor. Finalmente para la prueba de peso hidroestatico se pretende utilizar una canasta de malla de plastico, la cual estara sostenida por un estribo de acero, dicha canasta contendra el trozo de probeta que al



Figura 22. Equipos para medición de porosidad

¹ UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.

mismo tiempo estara sumergida dentro de un cubo con agua situado sobre la balanza electrica. Procedimientos en base a la norma UNE-EN 1015-18:2003¹

Calculo Modulo de elasticidad.

Se llevara a cabo una prueba no destructiva para calcular el modulo de elasticidad dinamico del material, determinado a traves de la velocidad de ondas de sonido provocadas por un martillo con punta de madera al impactar ciertas superficies de la probeta. Esta a su vez manda una señal de sonido a un microfono conectado a un ordenador el cual procesa la informacion mediante un software, indicando el valor de frecuencia de resonancia. Este procedimiento se basa en las instrucciones de la norma UNE-EN ISO 12680-1:2007²



Figura 23. Equipo medición cálculo de elasticidad

¹ UNE-EN 1015-18:2003 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.

² UNE-EN ISO 12680-1:2007 Métodos de ensayo para productos refractarios. Parte 1: Determinación del módulo de Young dinámico (MOE) por excitación de la vibración por impulso

V. ENSAYOS

Consistencia.

Teniendo una dosificación base, lo principal fue llevar a cabo una serie de amasados prueba de 5kg para buscar la consistencia más óptima en relación del agua con los tres distintos superplastificantes, tomando en cuenta el objetivo de la práctica de reducir la mayor cantidad de líquido posible sin perder manejabilidad, el procedimiento fue el siguiente:

- Primero se probó el SP1 y para esto lo que se hizo fue pesar tanto los áridos como el agua y el superplastificante.
- Seguido de esto, se mezclaron en un cubo plástico los áridos junto con el cemento hasta quedar homogeneizados.
- Posteriormente se vertió el 6% de agua.
- Una vez combinados el cemento, los áridos y el agua, se fue añadiendo 0.25% de superplastificante de forma paulatina.

Fue aquí donde se encontraron los primeros resultados ya que por más cantidad de superplastificante que se fuera añadiendo, la cantidad de agua era tan poca que se formaban una especie de grumos o esferas que no permitían que el líquido los penetrara, Figura 24. De tal forma que se decidió aumentar al contenido de agua y así repetir el mismo proceso.



Figura 24. Grumos de cemento por falta de agua

- La serie se repitió hasta llegar al 9% de agua y 5% de superplastificante, con esta dosificación nuevamente se obtuvieron cambios en la mezcla.

Efectivamente se logró el proceso de hidratación sin embargo se generó otro inconveniente, a pesar de que la manejabilidad de la masa es adecuada, el porcentaje de superplastificante sigue siendo lo suficientemente elevado que crea una repulsión entre el agua y los áridos que termina

por separarlos completamente como lo muestra la Figura 25 donde se puede observar en la mesa de sacudidas como termino el árido completamente filtrado.

- De tal forma que se repitió el mismo proceso aumentando al 10% de agua y rebajando a 4.5% de superplastificante. El resultado mejoro respecto a la prueba anterior sin embargo seguía existiendo la misma repulsión de líquido con los áridos.
- Finalmente se aumentó de nuevo el porcentaje de agua a 11% y se redujo el superplastificante a 4% y así, el resultado en cuanto a consistencia y homogeneidad de la masa fue satisfactorio, de tal forma que esta dosificación se utilizó como base.



Figura 25. Amasado con 9% de agua y 5% de SP



Figura 26. Amasado con 11% de agua y 4% de SP

Este mismo proceso fue repetido con el SP2 y SP3 y después de dicha variedad de pruebas se determinó que el porcentaje más óptimo para cada superplastificante y contenido de agua es el siguiente:

SP1 = 4% Agua = 2.75 l = 11%

SP2 = 2% Agua = 2.1 l = 8.4%

SP3 = 2% Agua = 2.05 l = 8.2%

Aditivo reductor de retracción.

Una vez adquirida la consistencia más óptima de cada uno de los superplastificantes, el siguiente Paso fue buscar obtener los mismos resultados de manejabilidad de la masa por cada porcentaje añadido del aditivo anti retracción. Para esto se decidió tomar únicamente la prueba de 6% ya que es la dosificación más elevada.

- Para la primera prueba se utilizó el porcentaje total de agua 11% el cual equivale a una cantidad de 2.75l. por otra parte se tomó el 4% de superplastificante de la dosificación optima encontrada en la prueba anterior y finalmente se añadieron 570g de aditivo reductor de retracción que corresponde al 6%.

Los resultados mostraron que el aditivo reductor de retracción al tener el mismo peso, volumen y densidad hicieron que la mezcla se tornara altamente liquida, de igual forma que si se le hubiera añadido la misma cantidad de peso en agua.

- Para corroborar los resultados de la prueba anterior se repitió el ensayo nuevamente, esta vez rebajando a la cantidad de agua, la mitad del peso de aditivo reductor (285g).

Como era de suponerse el contenido de líquido continuó siendo elevado, impidiendo la manejabilidad de la mezcla, de tal manera que se tomó la decisión de reducir en agua, la misma cantidad de peso del aditivo y así, funciono adecuadamente.

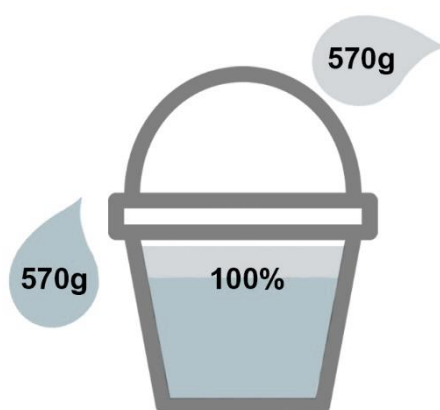


Figura 27. Diagrama sustitución de agua por aditivo reductor de retracción

Hormigonado.

Una vez se obtuvo el porcentaje de cada aditivo tanto superplastificante como de reductor de retracción, se llevaron estos a la cantidad de 25 kg requerida por amasado para mezclar en la hormigonera, en la cual se utilizó el mismo procedimiento de mezcla de los materiales.

- Se limpio la hormigonera de residuos previos y se humedeció la superficie interior.
- Se añadieron los áridos con el cemento.
- Se agrego el porcentaje estipulado de agua.
- Una vez mezclados los áridos con el agua, se vertió el porcentaje de superplastificante.

- Finalmente, para las pruebas que requerían aditivo reductor de retracción, se añadió su porcentaje correspondiente.

En el proceso de hormigonado se presentó un contratiempo, ya que la hormigonera tanto al momento de ser humedecida al inicio, como al ser limpiada entre cada amasado, ésta permanecía con cierto contenido de humedad variable e incuantificable, el cual alteraba el resultado final de consistencia del amasado, esto como se pudo ver en el apartado de consistencia, se debe a la volatilidad de reacción que tiene el agua con el aditivo superplastificante.

A continuación, se presentan dos imágenes en las que se puede observar dicha volatilidad ya que ambas cuentan con la misma dosificación de materias primas, únicamente variando en un 1.8% de agua equivalente a 50 ml.



Figura 28. amasado con 2.70 l de agua



Figura 29. amasado con 2.75 l de agua

Mesa de sacudidas.

La Mesa de sacudidas se utilizó principalmente para el mortero de referencia, en el cual se llevó a cabo el procedimiento siguiente.

- Utilizando el cono de bronce se vertió la mezcla a la mitad de su capacidad.
- Se giro la manivela levantando y dejando caer la mesa durante diez repeticiones.
- Se vació la mezcla en la mitad restante del cono, quedando al ras de este.
- Se retiro el cono y nuevamente se giró la manivela, esta vez durante 15 repeticiones.
- Finalmente se midió el diámetro que se obtuvo.

- El mortero de referencia tuvo un diámetro de 11cm el cual entra dentro de los rangos permitidos por la Norma UNE-EN 1015-3.¹

Para las pruebas con superplastificante no fue necesario este proceso ya que la plasticidad con la que cuenta no requiere del procedimiento de sacudidas, al mismo tiempo que si bien vemos que existe normativa como la UNE 83361:2007² la cual dictamina el tipo de ensayo para medir el escurrimiento de los hormigones autocompactantes, este no se tomó ya que los valores indicados en dicha normativa están enfocados para pruebas con áridos gruesos. sin embargo, se utilizó la mesa únicamente para analizar, medir y monitorear el diámetro de consistencia para que este, sea similar entre cada uno de los amasados.

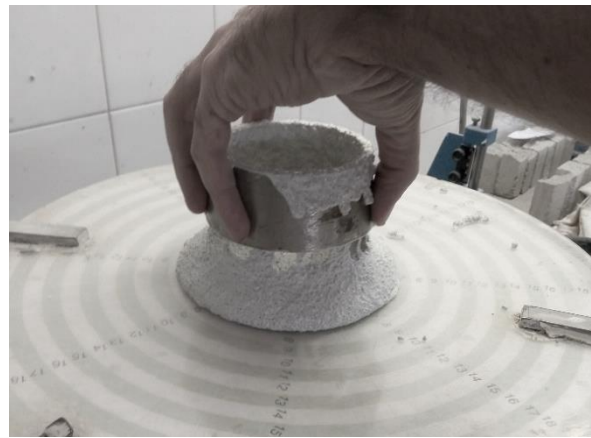


Figura 30. Vertido de mezcla en molde tronconico de bronce Figura 31. Retirada de cono para determinar el escurrimiento

Probetas

- Se vertió parte de la mezcla sobre los tres moldes de 4x4x16cm
- Posteriormente sobre un molde de 2x2x28.5cm
- Se utilizó una paleta de acero para aplanar la mezcla y que ésta quedara al nivel del molde.

Este último paso se utilizó especialmente para el amasado de referencia ya que los amasados con superplastificante no lo requirieron debido a su fluidez.

¹ UNE-EN_1015-3 *Metodos de ensayo de los morteros para albañilería, parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)*

² UNE 83361:2007 *Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez, Ensayo del escurrimiento*



Figura 32. Vertido de mezcla en molde probeta 4x4x16cm



Figura 33. Vertido de mezcla en molde probeta 2x2x28.5cm

- Finalmente, se vertió el resto del material sobre el molde de 75x45x2cm.
- De igual forma se utilizó una niveleta para aplanar el mortero de referencia y dejarlo a nivel del molde.

Nuevamente para los morteros con superplastificante no fue necesario utilizar la niveleta.



Figura 34. Vertido de mezcla en molde 75x45x2cm para losetas

- Todas Las probetas se dejaron dentro del laboratorio a temperatura ambiente.

VI. MEDICIONES Y PRUEBAS.

Pruebas a rotura.

a) Flexión.

- Se selecciono una probeta por cada uno de los tres moldes de 4x4x16.
- En la máquina Wykeham Farrance se rompió dichas probetas a flexión.
- Una vez teniendo la resistencia de cada una de las tres, se sumaron y se obtuvo una media.
- Como el valor que arroja la maquina es en kg, estos se introdujeron a un archivo de Excel el cual contenía un formulario determinado para convertirlo a mega pascales.

b) Compresión.

- Posteriormente se tomaron las 6 mitades de probetas restantes de la prueba de flexion y se probaron a compresión en la maquina Suzpecar.
- De igual forma que la prueba a flexión, estas 6 cifras se sumaron y se obtuvo la media.

En este caso el valor arrojado por la maquina fue en toneladas, que de igual manera se convirtieron a mega pascales.



Figura 35. Ensayo rotura a flexión



Figura 36. Ensayo rotura a compresión

Medición de retracción.

- Lo primero que se llevó a cabo fue utilizar una galga de acero para tarar el equipo, dicha galga se utilizara diariamente para sumar o restar el distinto valor que podría arrojar el aparato debido a cualquier alteración.
- Posteriormente se midieron cada una de las tres probetas y en un archivo de excel se anotó su valor.

Dichos valores se tomarán diariamente durante 28 días y se registrarán en una gráfica. En el esquema se deberán obtener curvas constantes ya sea ascendentes o descendientes, una vez graficadas, se analizarán y compararan con las otras dos probetas del mismo amasado. Finalmente se sacará una media entre los tres.



Figura 37. Equipo medición de retracción con galga de acero

Deformación de losetas

- Una vez endurecida la mezcla en los moldes de 75x45x2cm a Las 24 horas, las losetas se colocaron apiladas entre sí de forma vertical para ser analizados al final de la prueba y evaluar la deformación adquirida. Figura 38.

Para determinar dicha deformación, ya que actualmente existen normas para evaluar baldosas, pero no de estas dimensiones ni características, se pretende improvisar y utilizar un método coherente para estimar dichas deformaciones.

- Para esto se colocó la pieza de forma horizontal en una superficie completamente plana y a nivel. Figura 39.
- Se tomaron medidas de las longitudes de cada esquina para evaluar las retracciones que pudieron haber sufrido las piezas.
- Con una regla de aluminio perfectamente perfilada se montó sobre el borde longitudinal de la loseta, en donde se requería se perfiló con galgas de madera y se niveló. Figura 40.
- Se marcaron tres distancias distintas para llevar a cabo la medición, en los extremos de la pieza y en el centro
- Una vez ajustado todo, finalmente se midió la distancia entre el borde de la regla y la loseta con un calibrador pie de rey para medir la distancia de deformación. Figura 41.



Figura 38. Almacenaje de losetas

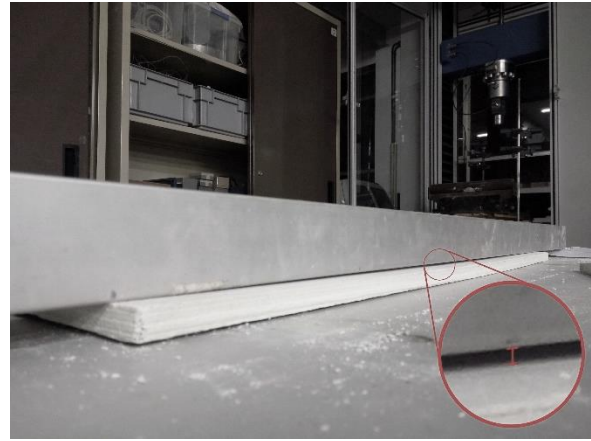


Figura 39. Distancia de deformación entre regla y loseta



Figura 40. Perfilado de loseta con galgas y niveleta



Figura 41. Medición deformación de loseta con pie de rey

Calculo Modulo de elasticidad.

De las tres probetas que se ensayaran a los 28 días, se contempló previamente utilizar una de ellas para llevar a cabo la prueba de módulo de elasticidad dinámico, el procedimiento fue el siguiente.

- Se peso la probeta en una balanza eléctrica con precisión de 0.01g.
- Utilizando un pie de rey con una precisión de 0.01mm, se tomó las dimensiones de anchura, espesor y longitud, los cuales determinaron la densidad aparente del material.
- Se monto la probeta sobre unos soportes de poliestireno con forma prismática los cuales sirven para aislar la probeta de vibraciones externas.
- Se coloco el micrófono en un extremo del perfil de 4x4cm de la probeta, a una distancia de 2 cm de separación.

MoE flexion.

- Con el martillo de punta de madera se impactó reiteradamente la superficie superior de la probeta, se repitió este procedimiento hasta que los valores arrojados por el programa fueron semejantes uno al otro y se registraron los últimos seis valores.

MoE longitudinal.

- Se repite el procedimiento anterior con la única diferencia que los impactos en la probeta se producen en la superficie longitudinal.
- Una vez registrado el peso, las dimensiones y los valores producidos por las ondas de sonido, estas se vació en un archivo de Excel el cual contenía una serie de formulaciones las cuales dan como resultado el valor total del módulo de elasticidad de la probeta tanto a flexión como longitudinal.



Figura 42. Ensayo determinación módulo de elasticidad

Medición de porosidad.

Peso seco. Figura 43.

- Para determinar el peso seco del trozo de probeta, esta se dejó secar en el horno durante 24 horas, posteriormente se pesó en una báscula eléctrica con precisión de 0.01g.

Peso saturado. Figura 44.

- El peso saturado se basó en colocar el trozo de probeta dentro de la cámara de vacío, a la cual se le succiono el aire durante 2 horas, seguido de esto durante 1 hora el tanque se llenó de agua por medio de un goteo paulatino. Posteriormente las muestras se dejaron sumergidas en el agua durante 2 horas más. Finalmente, pasado este tiempo se retiró el

trozo de probeta del tanque, con una franela húmeda se extrajo el exceso de agua y se pesó en la misma bascula.

Peso hidrostático. Figura 45.

- Para el peso hidrostático se tomó la misma probeta utilizada en la prueba anterior la cual estuviera saturada de agua y se colocó dentro de la canasta.
- Se colocó el contenedor con agua sobre la balanza eléctrica y se taró el equipo.
- Posteriormente se cogió la canasta con la probeta en su interior y se depositó dentro del contenedor de agua para que ésta quedara completamente sumergida, se tomó en cuenta que la muestra no estuviera en contacto con alguna de las paredes del contenedor y finalmente se registró el peso.



Figura 43. Proceso de secado de muestras en horno



Figura 44. Proceso de saturación de agua en muestras



Figura 45. Medición de peso hidrostático

VII. RESULTADOS.

Después de analizar y estudiar los resultados obtenidos en todos los ensayos, se tomó la determinación de omitir las pruebas de 2% de aditivo reductor de retracción, en los tres distintos superplastificantes, esto debido a que, al ser los últimos amasados que se realizaron, los materiales empleados fueron de dudosa procedencia, en cuanto a la calidad del almacenaje del cemento y la granulometría de los áridos. Esto al verse reflejado en los resultados, se decidió descartarlos.

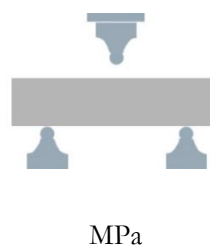
Ensayos de rotura.

Flexión.

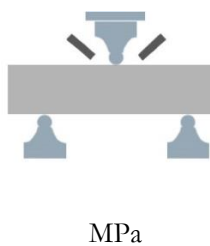
La Tabla 6. muestra los valores de resistencia a flexión a las edades de 1, 7 y 28 días, de cada uno de los superplastificantes, en donde se exponen los distintos porcentajes de aditivo reductor de retracción, en comparación con el amasado de referencia (A REF).

Tabla 6. Resistencia a flexión por amasado a 1, 7 y 28 días.

Edad (días)		1	7	28
A REF		7.7	6.5	9.6
SP1	0%	6.5	8.2	12.3
	1%	8.9	9.2	11.87
	3%	12	13.1	12.4
	6%	1.9	13.6	12.6



Edad (días)		1	7	28
A REF		7.7	6.5	9.6
SP2	0%	12.8	15.1	10.2
	1%	13.3	14.1	10.6
	3%	13	13.7	12.9
	6%	2.5	14.4	12



Edad (días)		1	7	28
A REF		7.7	6.5	9.6
SP3	0%	12.7	14.5	11.5
	1%	11.6	10.8	16.1
	3%	15.5	11	19.1
	6%	13.9	11.5	12.8



En las Figuras 46. 47. 48. se presentan en forma de grafica las trayectorias asumidas de las curvas de resistencias a flexión con el paso del tiempo de dichos superplastificantes, con sus respectivos porcentajes de reductor de retracción, de igual forma se muestra el amasado de referencia (A REF)

Superplastificante SP1

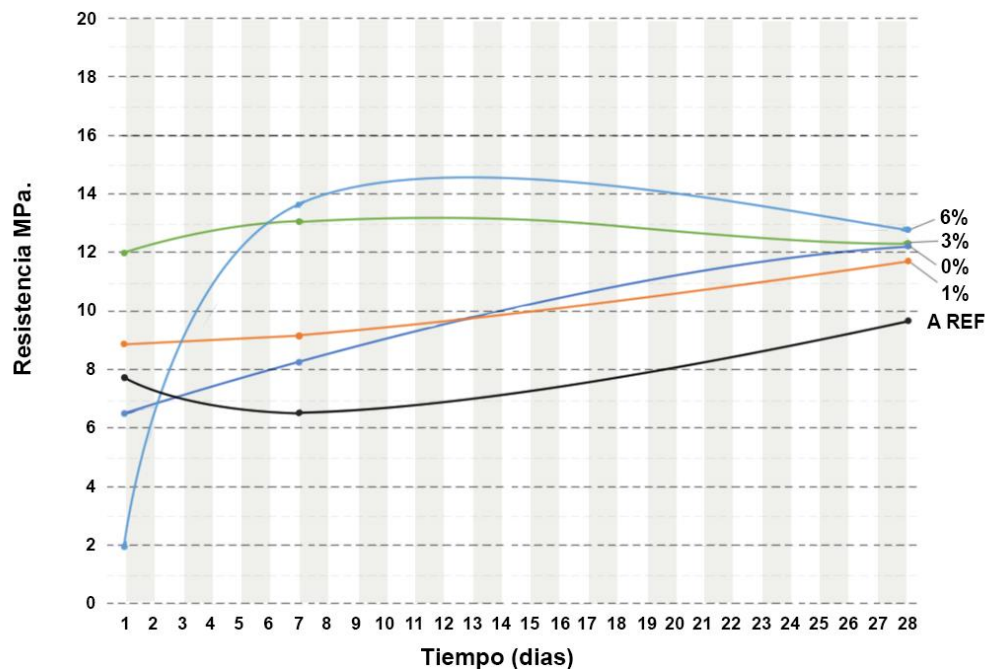


Figura 46. Trayectoria de resistencia a flexión en el tiempo SP1 y A REF

Superplastificante SP2.

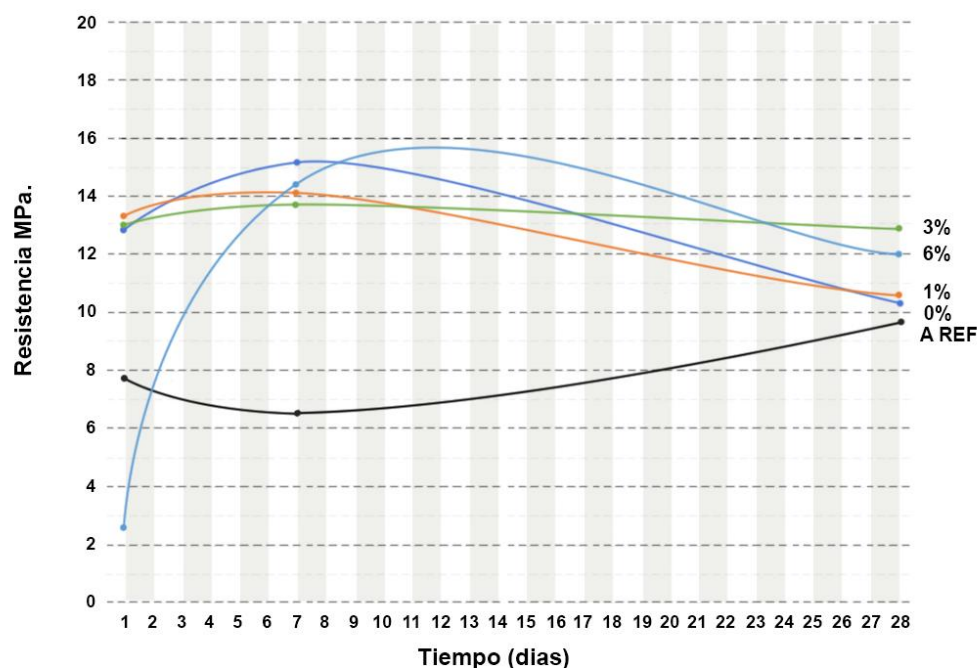


Figura 47. Trayectoria de resistencia a flexión en el tiempo SP2 Y A REF

Superplastificante SP3.

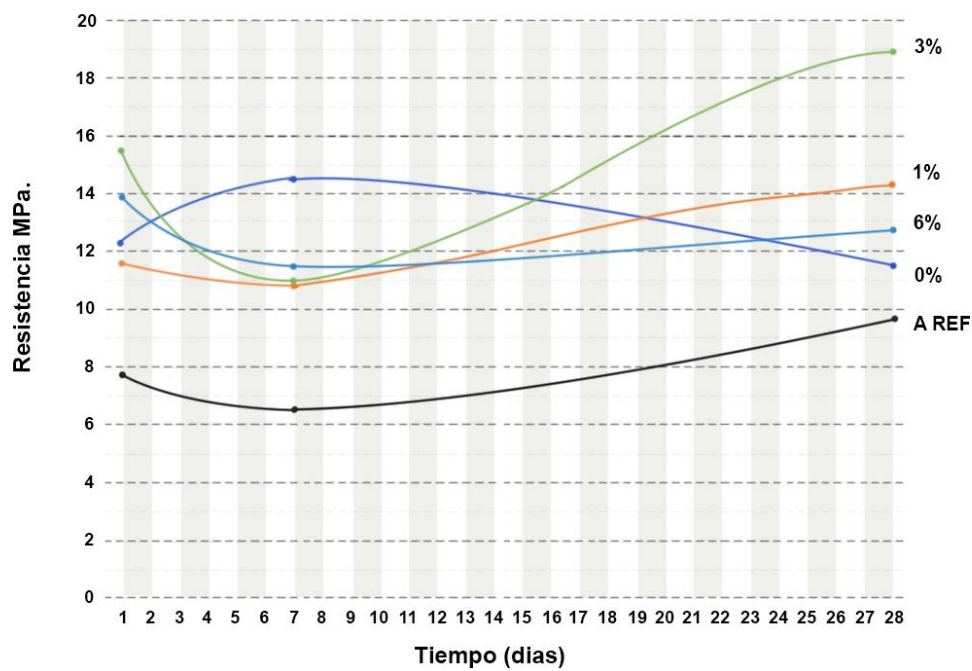


Figura 48. Trayectoria de resistencia a flexión en el tiempo SP3 Y A REF

La Figura 49. muestra la trayectoria de los picos más favorables con los más desfavorables unidos por un hatch, de las curvas presentadas en las gráficas anteriores de resistencia a flexión de cada uno de los tres superplastificante.

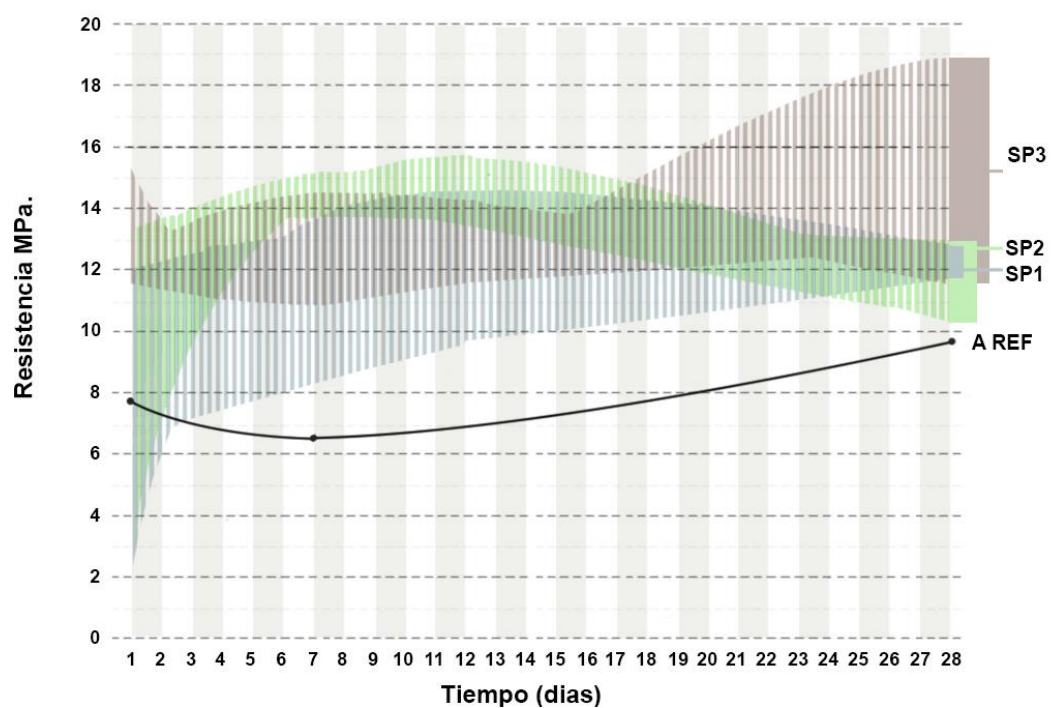


Figura 49. Trayectoria de picos favorables y desfavorables a flexión de los 3 superplastificantes Y A REF en el tiempo

En la gráfica del SP1 se puede observar que la resistencia de rotura a flexión a edades avanzadas (28 días) puede ser mayor entre más aditivo reductor de retracción se emplee, sin embargo, se observa que, utilizándolo en altas cantidades, tiende a comportarse como retardador de fraguado, ya que, al observar la gráfica, el amasado con el 6% de aditivo, tiene el valor más bajo de resistencia inicial al día 1.

En cuanto al SP2, se puede observar un comportamiento bastante similar al anterior, ya que tanto el 3% como el 6% arrojan los valores finales más altos, por otro lado, los valores iniciales son superiores al superplastificante anterior, sin embargo, estos tienden a sufrir pérdidas de resistencia al día 28 y por último igual que en el SP1, el 6% muestra una resistencia inicial muy por debajo del resto.

Finalmente, en el SP3 se puede observar que todos los amasados con aditivos tienen una mejora en las resistencias al día 1, sin embargo, estos sufren una caída considerable el día 7 con excepción del 0%, la cual no se había visto en las muestras anteriores. Por otra parte, se puede observar que los que cuentan con los mejores resultados iniciales, en este caso el 3% y el 6%, son los que sufren mayor caída durante este periodo, sin embargo, con el tiempo esta resistencia incrementará, inclusive el 3% llega a superar ampliamente a todos los anteriores.

Si tomamos cada uno de los tres superplastificantes sin aditivo reductor de retracción (0%), se puede observar que este, después del amasado de referencia, es quien arroja los valores finales más bajos, sin embargo, es el que tiene un comportamiento más estable durante las etapas previas, en comparación que los amasados que si cuentan con dicho aditivo reductor.

Si bien sabemos que el hormigón no tiene un buen desempeño en resistencias a flexión y los resultados pueden ser un tanto irrelevantes en comparación a los ensayos a compresión, esto es un buen parámetro para darnos cuenta del comportamiento que va tener el material y las mejoras mecánicas ya que se puede observar que existe un incremento de resistencias entre los amasados con superplastificante en comparación con el amasado de referencia, este pudiendo incrementar aún más, añadiendo aditivo reductor de retracción.

Compresión.

La Tabla 7. muestra los valores de resistencia a compresión a las edades de 1, 7 y 28 días, de cada uno de los superplastificantes, con sus respectivos porcentajes de aditivo anti retracción, de igual forma se presenta la comparación con el amasado de referencia (A REF).

Tabla 7. Resistencia a compresión por amasado a 1,7 y 28 días.

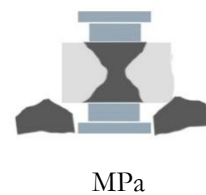
Edad (días)		1	7	28
A REF		47.32	60.31	65.52
SP1	0%	51.05	74.16	68.94
	1%	54.41	71.49	76.75
	3%	52.55	79.30	79.70
	6%	3.74	72.81	75.38



Edad (días)		1	7	28
A REF		47.32	60.31	65.52
SP2	0%	65.40	88.12	92.07
	1%	63.59	98.09	95.15
	3%	57.90	74.97	86.09
	6%	16.64	73.02	81.96



Edad (días)		1	7	28
A REF		47.32	60.31	65.52
SP3	0%	72.41	83.86	92.38
	1%	72.56	74.71	73.38
	3%	62.87	84.02	79.18
	6%	60.20	84.42	96.73



En las figuras 51. 52. 53. se muestran las trayectorias asumidas de las curvas de resistencia a compresión de cada superplastificante con su porcentaje de aditivo reductor de retracción, estos con relación al paso del tiempo. De igual forma se muestra el amasado de referencia (A REF).

Superplastificante SP1.

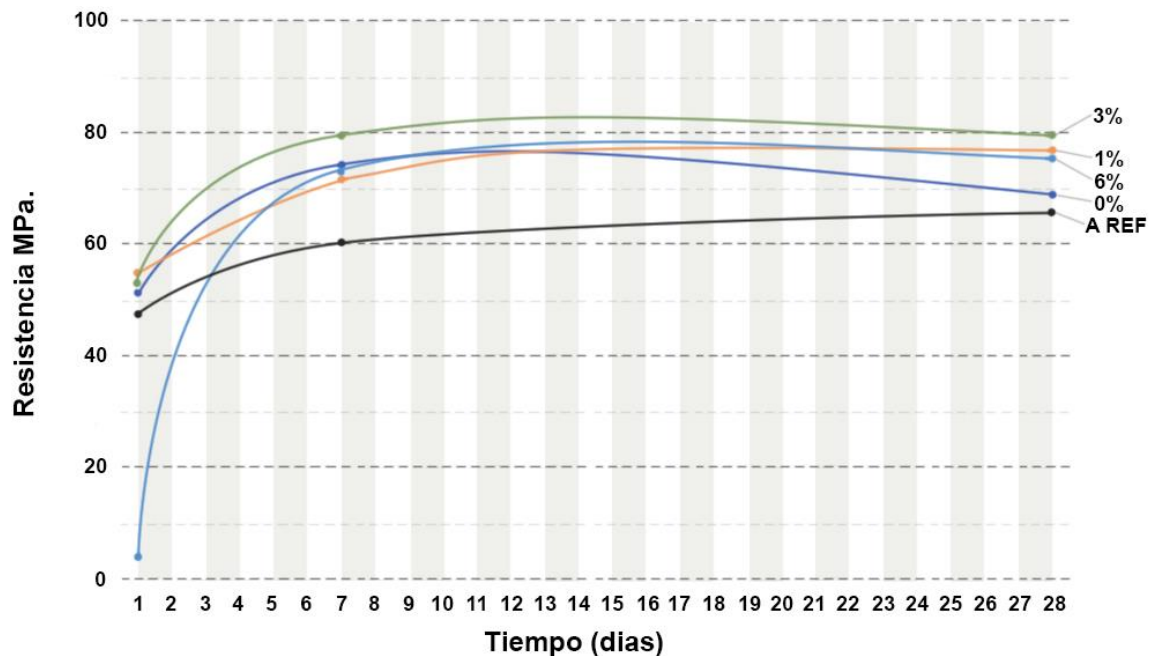


Figura 50. Trayectoria de resistencia a compresión en el tiempo SP1 Y A REF

Superplastificante SP2

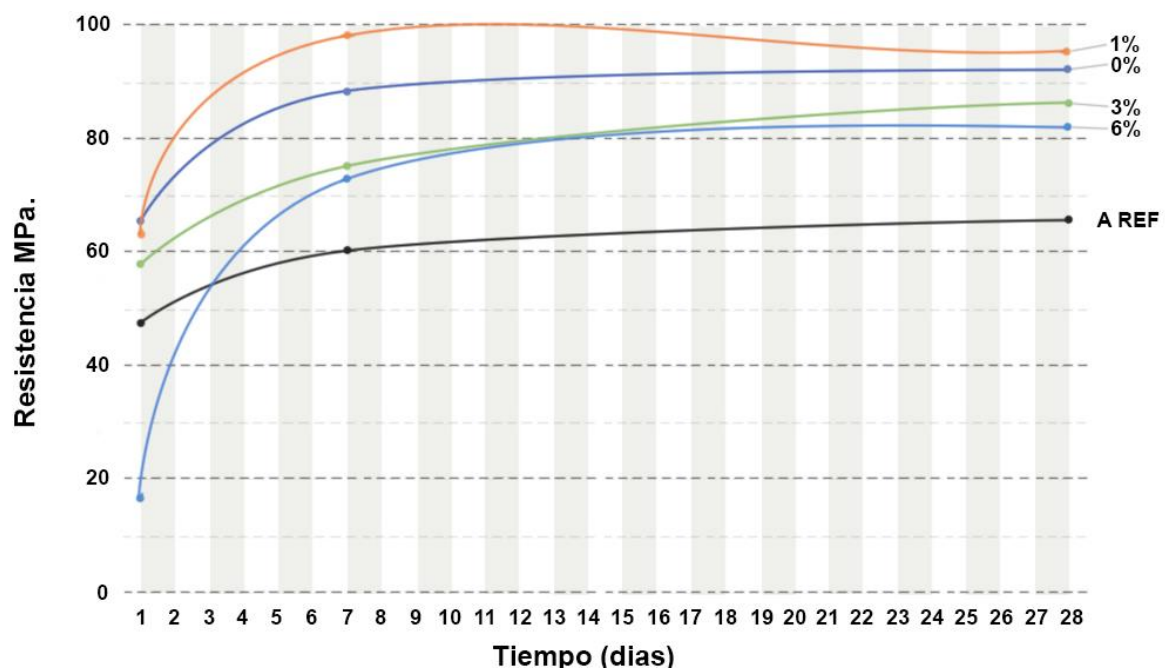


Figura 51. Trayectoria de resistencia a compresión en el tiempo SP2 Y A REF

Superplastificante SP3

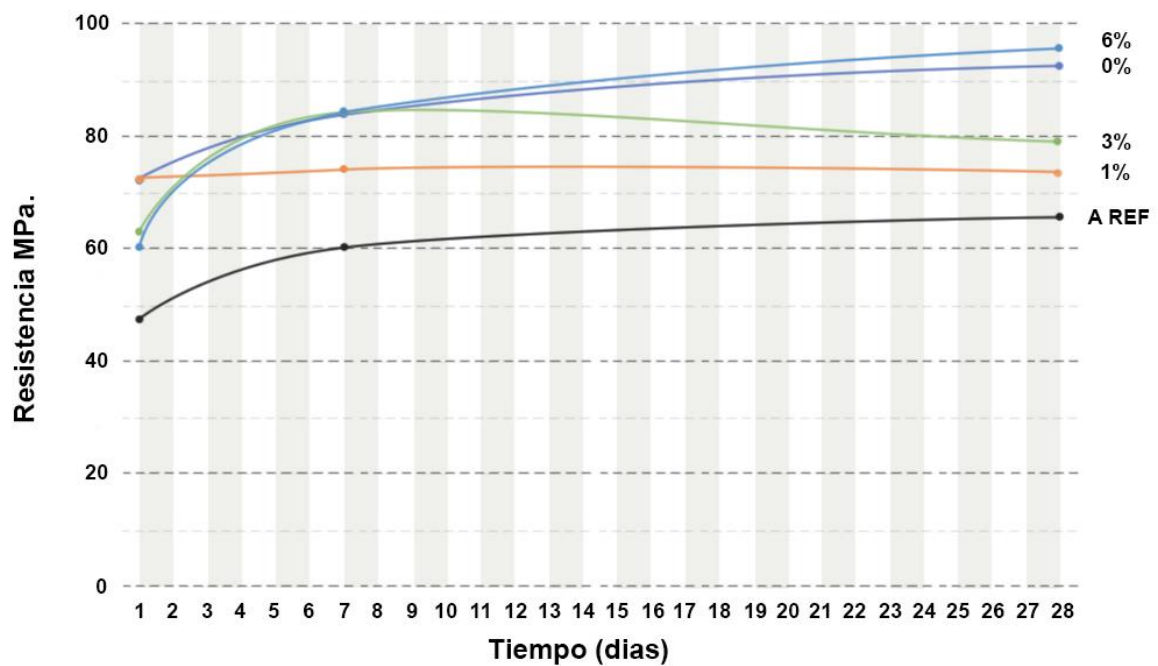


Figura 52 Trayectoria de resistencia a compresión en el tiempo SP3 A REF

La figura 53. indica la trayectoria de los picos más favorables con los más desfavorables de las curvas presentadas en las gráficas anteriores de resistencia a compresión de cada uno de los tres superplastificantes.

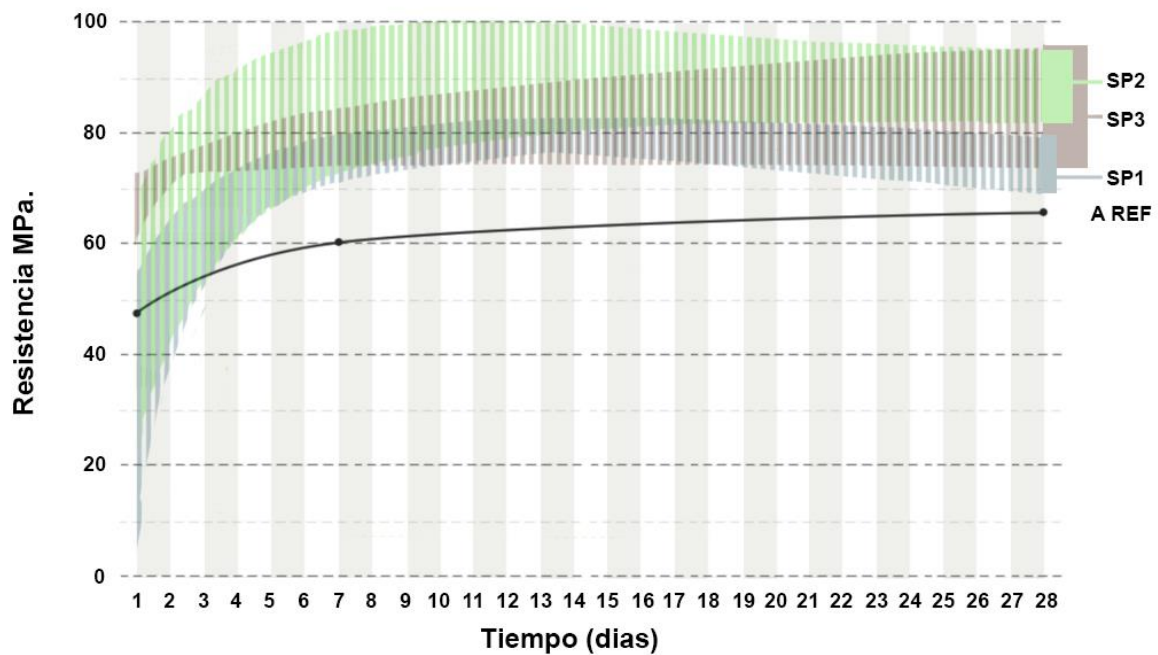


Figura 53. Trayectoria de picos favorables y desfavorables a compresión de los 3 superpastificantes Y A REF en el tiempo

En cuanto a los resultados a compresión el SP1 es claro que todas las pruebas con aditivo superan ampliamente al amasado de referencia, y ligeramente al 0%, mientras que la diferencia del resto que, si cuentan con aditivo reductor de retracción, es bastante reducida, sin embargo, al igual que en las pruebas a flexión el 6% es considerablemente más bajo que el resto en las etapas iniciales.

Continuando con el SP2 se puede observar que los valores finales más altos son de los amasados sin o con un porcentaje muy bajo de aditivo reductor de retracción, en este caso 0% y 1%, mientras que el 3% y 6% arrojan los valores más bajos, finalmente se repite el patrón de baja resistencia inicial del 6%.

El SP3 por su parte tiene una resistencia más constante que los anteriores, ya que el aumento entre el día 1, 7 y 28 es paulatino, sin embargo, en este caso hay una gran diferencia de valores finales entre los más altos 6% y 0% con los más bajos 3% y 1%. Finalmente, a diferencia de los anteriores el 6% tiene una resistencia inicial normal con relación al resto.

En las gráficas anteriores podemos observar que efectivamente, cada uno de los superplastificantes sin importar el porcentaje de aditivo reductor de retracción, tienen una mejora en su resistencia final de rotura a flexión y compresión a los 28 días, en comparación con el amasado de referencia.

A su vez se muestra que entre los superplastificantes conforme aumenta el número, estos llegan a tener mejores resistencias ya que el SP2 supera al SP1 y el SP3 a los dos anteriores, sin embargo, el SP2 y SP3 pueden sufrir ligeras pérdidas de resistencia final que inclusive sobrepasando al SP1, especialmente a flexión.

En cuanto a la adquisición de resistencia con el tiempo, se puede observar que el SP1 tiene un incremento paulatino durante los 28 días, mientras que el SP2 tiene una resistencia inicial bastante elevada, la cual posteriormente se vuelve constante. Por último, el SP3 tiene una resistencia creciente de forma lineal durante todo este periodo.

Finalmente, para poder tener una idea de los valores a rotura de este tipo de materiales, actualmente no existe normativa la cual los indique, sin embargo, con la información proporcionada por la empresa MC Spain, se sabe que los fabricantes de este tipo de materiales obtienen un rango de entre 8-14 MPa a flexión y 75-90 MPa a compresión, si los comparamos con los resultados de estas pruebas, haciendo de lado al amasado de referencia y al SP1 con 0% de aditivo reductor de retracción, el resto están entre ese rango e inclusive por encima.

Retracción.

La tabla 8. muestra los valores de retracción que sufrieron cada uno de los distintos amasados a los 28 días, se indica el tipo de superplastificante con su respectivo aditivo reductor de retracción, al igual que el amasado de referencia (A REF).

Tabla 8 Valores de retracción a 28 días de cada amasado.

		Retracción mm/m			Retracción mm/m			Retracción mm/m
A REF		-0.69	A REF		-0.69	A REF		-0.69
SP1	0%	-0.69	SP2	0%	-0.38	SP3	0%	-0.30
	1%	-0.39		1%	-0.34		1%	-0.35
	3%	-0.49		3%	-0.36		3%	-0.42
	6%	-0.36		6%	-0.37		6%	-0.36



En las figuras 54. 55. 56. se muestra el trayecto de curvas de retracción de cada uno de los superplastificantes con su correspondiente aditivo reductor de retracción, dichas medidas se tomaron diariamente durante 28 días, a su vez se indica en línea negra el amasado de referencia.

Superplastificante SP1.

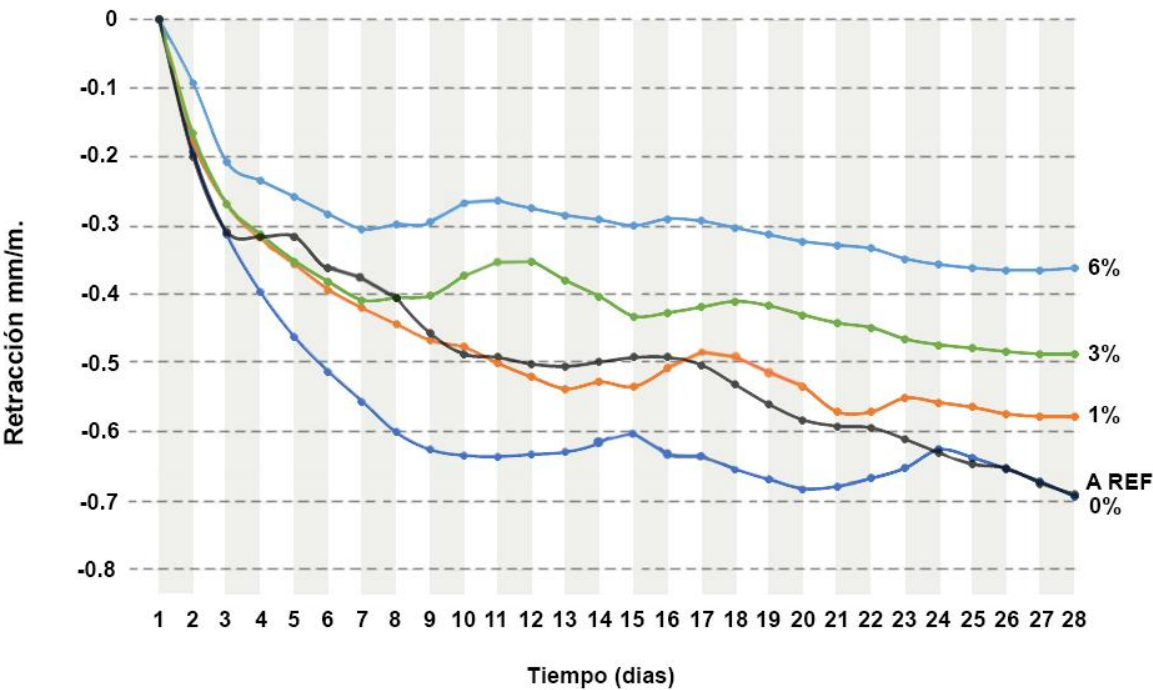


Figura 54. Grafica trayecto de curvas de retracción con relación al tiempo SP1

Superplastificante SP2

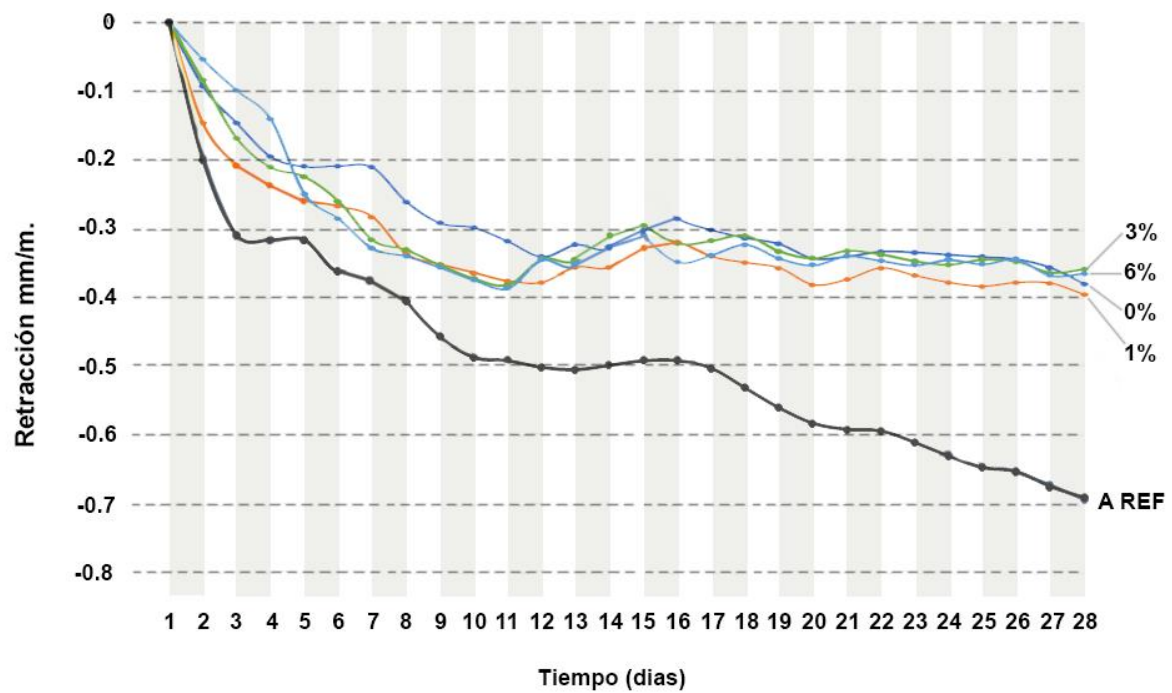


Figura 55. Grafica trayecto de curvas de retracción con relación al tiempo SP2

Superplastificante SP3

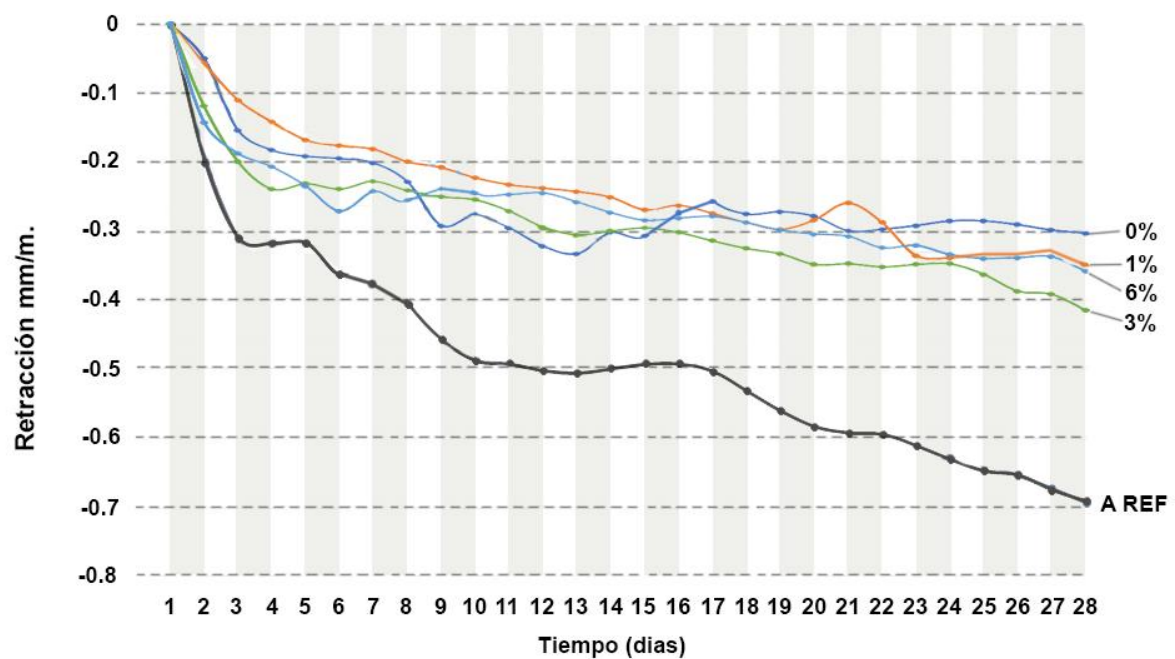


Figura 56. Grafica trayecto de curvas de retracción con relación al tiempo SP3

La figura 57. indica la trayectoria de los picos más favorables con los más desfavorables de las curvas presentadas en las gráficas anteriores de retracción de cada uno de los tres SP.

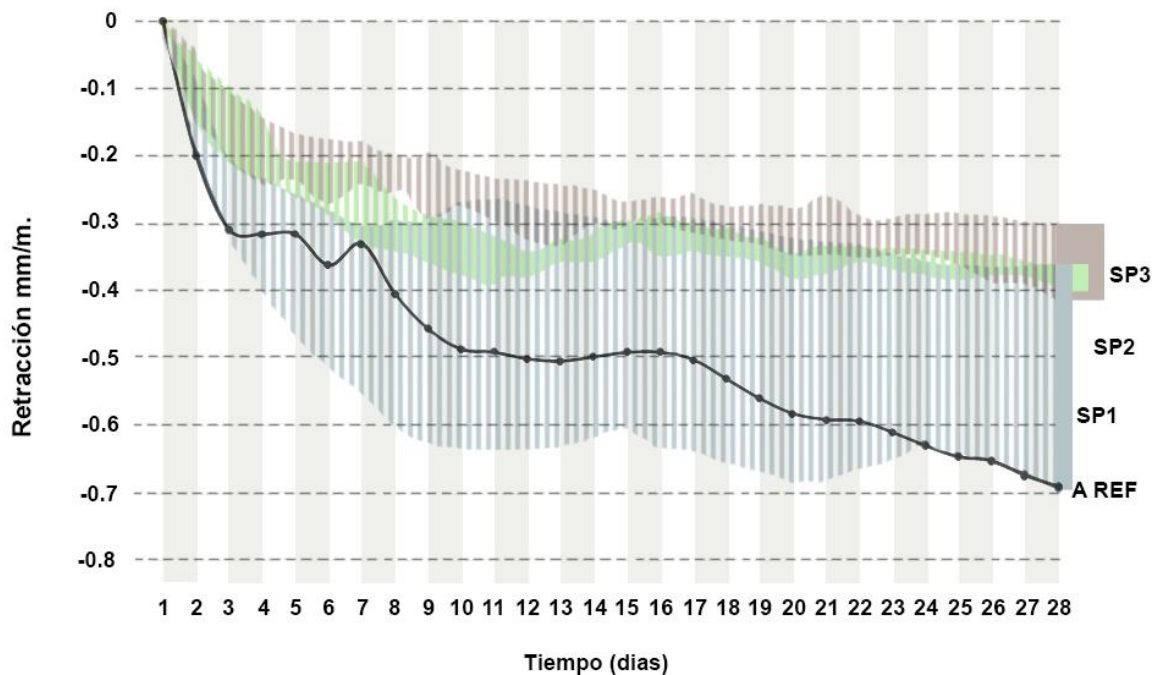


Figura 57. Trayectoria de picos favorables y desfavorables de retracción de los 3 superplastificantes Y A REF en el tiempo

Analizando la gráfica del SP1, se puede observar claramente una mejora en la disminución de retracción entre más aditivo reductor se añade, por otra parte se observa que el superplastificante por sí mismo crea un aumento en la retracción inicial, el cual es contrarrestado con el aditivo reductor de retracción, ya que si observamos la prueba con 0%, este tiene una retracción final prácticamente igual que el amasado de referencia, sin embargo sufre una retracción inicial mucho más significativa, al igual que el 1% y el 3% los cuales tienen una retracción inicial similar al amasado de referencia, sin embargo con el tiempo la irán superando, finalmente se puede observar que el desempeño del 6% es ampliamente superior a los anteriores tanto inicial como final.

En cuanto al SP2 en general desde el 0% al 6% todos tienen un desempeño más óptimo, superando inclusive al mejor porcentaje del superplastificante anterior, de tal manera que la diferencia entre estos es insignificante, únicamente se podría decir que el 6% ligeramente mejora la retracción inicial a comparación con el resto, seguido por el 0%.

Finalmente, el SP3 se puede observar que nuevamente, este mejora al superplastificante anterior, ya que fuera del 3% que está a la par de estos, el resto es ampliamente superior, en este caso se muestra cierto patrón en cuanto a que, entre menos porcentaje de aditivo reductor de retracción se añada, mejor será el desempeño, ya que el 0% arroja el mejor resultado final, seguido por el 1%, y en cuanto a retracción inicial, de igual forma son estos dos mismos a la inversa.

Deformación de losetas.

La Tabla 9. muestra las medidas en los puntos donde sufrió la mayor distancia de deformación en cada uno de los lados (corto, largo) de la loseta, en el periodo final de entre 50 y 70 días aprox.

Tabla 9. Resultados deformación de losetas

		Largo mm	corto mm
A REF		1.21	1.89
SP1	0%	1.70	1.16
	1%	1.67	1.0
	3%	2.19	0
	6%	2.35	0.66
SP2	0%	3.12	2.37
	1%	2.30	1.05
	3%	2.53	0.71
	6%	3.14	0
SP3	0%	0.91	2.0
	1%	3.07	0.46
	3%	2.74	0.40
	6%	2.36	1.28

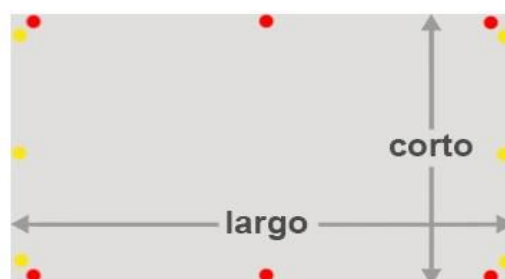


Figura 58. Puntos de medición tomados en corto y largo de loseta

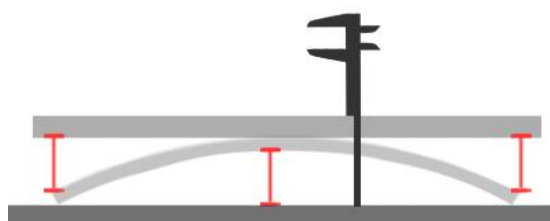


Figura 59 Diagrama medidas en elevación de loseta

Los resultados de las medidas de deformación de las losetas no muestran ninguna relación entre el tipo de superplastificante con los porcentajes de aditivo reductor de retracción, por lo tanto, no son coherentes en comparación a cualquiera de los otros ensayos realizados, esto es debido a que las dimensiones de deformación son tan reducidas, en algunos casos insignificantes, que les restan precisión. Sin embargo, existe una gran diferencia estética entre la superficie de las losetas con aditivos con la del amasado de referencia. Figura 60. y Figura 61.



Figura 60 Loseta Amasado referencia.

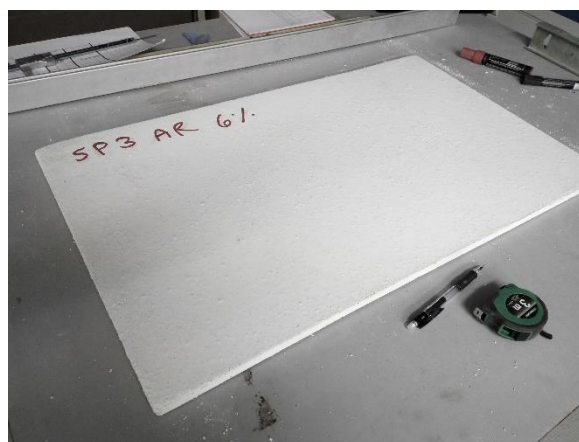


Figura 61 Loseta amasado con aditivo.

Módulo de elasticidad.

La Tabla 10. Muestra los resultados de los ensayos de módulo de elasticidad tanto a flexión como a compresión llevados a cabo en probetas a los 28 días de edad.

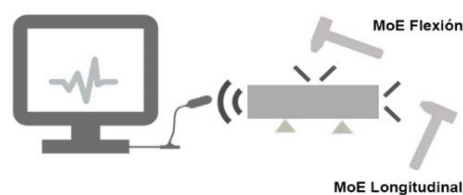


Tabla 10. Resultados módulo de elasticidad.

		MoE Flexion	MoE Long. MPa			MoE Flexión	MoE Long.			MoE Flexión	MoE Long.
A REF		33543	4359	A REF		33543	4359	A REF		33543	4359
SP1	0%	34863	4907	SP2	0%	40717	5799	SP3	0%	41990	5894
	1%	36995	5401		1%	47840	7189		1%	41942	5807
	3%	36910	5280		3%	46895	6197		3%	44312	6241
	6%	37766	5186		6%	37404	5204		6%	44456	6291

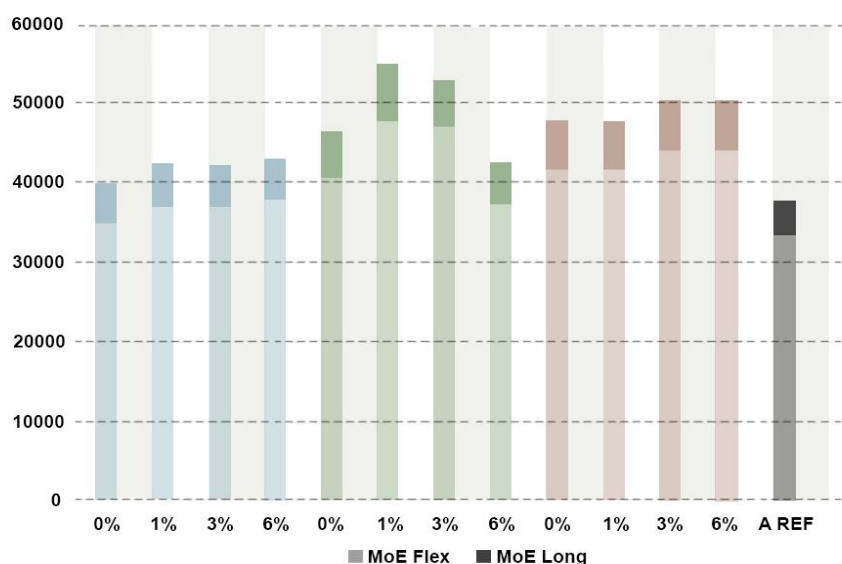


Figura 62. Grafica resultados módulo de elasticidad.

En los resultados de las pruebas del módulo de elasticidad dinámico, se puede observar que hay coherencia entre los valores del módulo a flexión con los valores del módulo longitudinal, a su vez se percibe cierta similitud en comparación a los resultados arrojados en los ensayos a rotura especialmente a compresión. En cuanto a la relación de las probetas de aditivos con el amasado de referencia, al igual que todas las pruebas anteriores es claro que el valor del módulo con cualquier porcentaje de aditivos es mayor.

Por otra parte, valorando independientemente cada uno de los superplastificantes se muestra que el SP1 aumenta todavía más cuando es añadido aditivo anti retracción sin importar su cantidad, mientras que el SP2 el resultado es inconstante, finalmente el SP3 se incrementa paulatinamente conforme se aumenta el porcentaje de aditivo anti retracción del 0 al 6% respectivamente.

Porosidad.

La tabla 11. y la figura 63. muestran la relación de valores entre los pesos seco, saturado e hidrostático con sus equivalentes densidades tanto aparente, como relativa. finalmente, el porcentaje de porosidad de cada uno de los amasados.

Tabla 11. Resultados de los ensayos de porosidad.

	Anti Retracción %	Peso Hidrostático g	Peso Saturado g	Peso Seco g	Densidad Aparente %	Densidad Relativa %	Porosidad %
SP1	0	28.78	67.19	64.21	2.23	2.49	10.4
	1	27.9	64.94	62.93	2.26	2.43	7.2
	3	31.48	73.89	71.82	2.28	2.44	6.6
	6	22.61	53.32	51.31	2.27	2.49	8.9
SP2	0	37.7	76.42	74.12	2.34	2.52	7.3
	1	36.6	90.12	88.19	2.41	2.54	5.3
	3	28.88	70.24	67.57	2.34	2.58	9.2
	6	25.28	61.91	59.91	2.37	2.57	7.9
SP3	0	30.98	73.95	71.49	2.31	2.51	7.9
	1	33.32	81.55	79.21	2.38	2.56	7.0
	3	29.17	69.48	67.79	2.32	2.47	5.8
	6	31.21	75.3	73.31	2.35	2.51	6.4
A REF		32.56	76.22	71.12	2.18	2.59	15.7

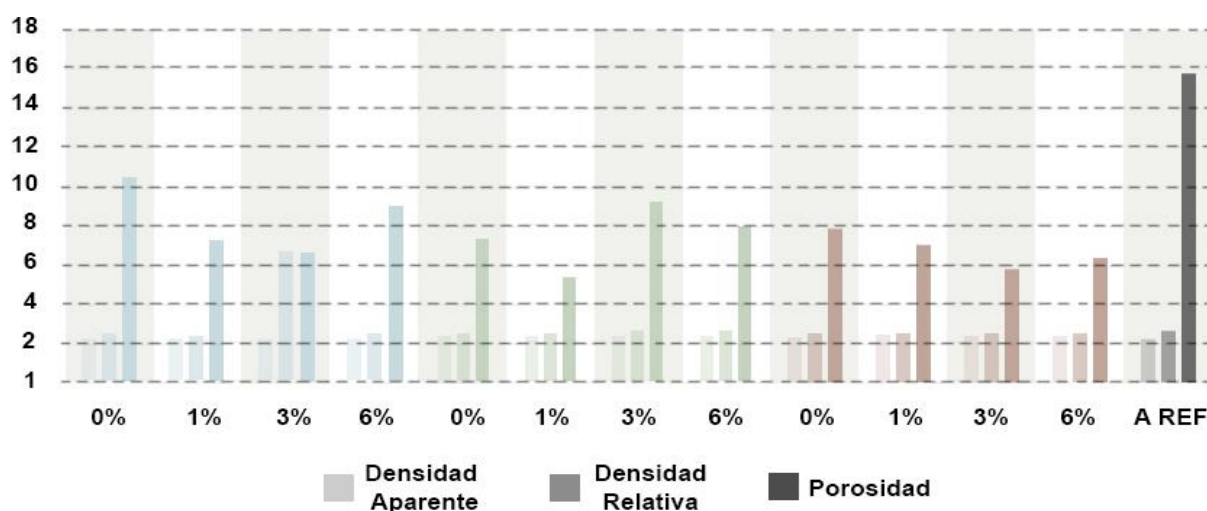


Figura 63. Grafica resultados de ensayos de porosidad

La tabla y la gráfica de porosidad muestran que al igual que las pruebas anteriores, las pruebas con aditivo disminuyen considerablemente el porcentaje de porosidad a comparación con el amasado de referencia, mientras que para el SP1 y SP2 estos valores se relacionan directamente a los resultados arrojados por las pruebas a compresión, el SP3 tiende a ser variable en comparación a dichas pruebas de compresión, ya que las diferencias entre estos es bastante reducida.

Tablas resumen de ensayos realizados.

Las tablas 12. 13. 14. muestran un resumen de los valores máximos obtenidos por cada uno de los distintos amasados respecto a cada ensayo realizado, a la edad de 28 días.

Tabla 12. Resumen valores máximos obtenidos de cada ensayo SP1

		Flexión MPa	Compresión MPa	Porosidad %	MoE MPa		Retracción mm
					Flexión	Long.	
A REF		9.6	65.52	15.7	33543	4359	-0.69
SP1	0%	12.3	68.94	10.4	34863	4907	-0.69
	1%	11.7	76.75	7.2	36995	5401	-0.39
	3%	12.4	79.70	6.6	36910	5280	-0.49
	6%	12.6	75.38	8.9	37766	5186	-0.36

Tabla 13. Resumen valores máximos obtenidos de cada ensayo SP2

		Flexión MPa	Compresión MPa	Porosidad %	MoE MPa		Retracción mm
					Flexión	Long.	
A REF		9.6	65.52	15.7	33543	4359	-0.69
SP2	0%	10.2	92.07	7.3	40717	5799	-0.38
	1%	10.6	95.15	5.3	47840	7189	-0.34
	3%	12.9	86.09	9.2	46895	6197	-0.36
	6%	12.0	81.96	7.9	37404	5204	-0.37

Tabla 14. Resumen valores máximos obtenidos de cada ensayo SP3

		Flexión MPa	Compresión MPa	Porosidad %	MoE MPa		Retracción mm
					Flexión	Long.	
A REF		9.6	65.52	15.7	33543	4359	-0.69
SP3	0%	11.5	92.38	7.9	41990	5894	-0.30
	1%	14.2	73.38	7.0	41942	5807	-0.35
	3%	19.1	79.18	5.8	44312	6241	-0.42
	6%	12.8	96.73	6.4	44456	6291	-0.36

CAPITULO 3 COMENTARIOS Y DISCUSION.

Para concluir es importante comenzar diciendo que el punto principal de este documento es dotar de información a los fabricantes de materiales prefabricados tanto de morteros como hormigones HAC, los cuales puedan tomarlo como pauta para valorar los materiales, tipo de aditivos y dosificaciones que pueden utilizar para mejorar sus productos, así que para llevar a cabo la práctica se decidió emplear métodos y ambientes utilizados por estos mismos.

Para profundizar más en esto se tiene que mencionar el método de fabricación de la mezcla de cada una de las muestras, al tomar la decisión de fabricar piezas de dimensiones considerables se optó por utilizar una hormigonera para llevar a cabo el proceso de mezclado, ya que el amasado a mano o en amasadora no daban abasto para tal cantidad, sin embargo, esto pudo haber generado ciertas diferencia entre un amasado y otro, ya que el control de producción de este método puede no ser el más exacto en una cantidad un tanto reducida para ser preparada en hormigonera, ya que si bien los otros métodos le quedaban cortos, la hormigonera le quedaba algo sobrada, por otra parte al igual que dichos fabricantes, el almacenaje de las piezas se dejó a temperaturas ambiente para no incidir en el desempeño de las muestras.

Después de analizar y estudiar los resultados obtenidos por cada uno de los ensayos, se puede deducir principalmente que los mejores rendimientos de cada prueba no tienen una relación tan alta con los fenómenos de retracción que el material vaya a tener, ya que si bien sabemos que los valores de rotura están ligados directamente a los valores de porosidad y a su vez del módulo de elasticidad, esto no significa que estos, al ser altos vayan a sufrir menor retracción o alabeo, de hecho en la práctica tiende a ser a la inversa, ya que números más altos de resistencia y módulo de elasticidad que a su vez tengan poca porosidad, harán que el material sea más compacto y mientras esto sucede durante el proceso de hidratación, el material está más propenso a sufrir efectos de retracción y deformación.

El ejemplo anterior se puede ver reflejado perfectamente en las pruebas a mayor escala, en este caso las losetas de 75cm x 45cm ya que tanto visualmente, como en medidas podemos deducir que el amasado de referencia además de obtener una apariencia antiestética es quien menor deformación sufrió, sin embargo, fue quien obtuvo las resistencias más bajas en cada una de las pruebas anteriores.

Es aquí donde encontramos una contradicción de resultados ya que, si analizamos las pruebas de retracción con las probetas de 2x2x28.5cm, podemos observar que el amasado de referencia es quien tuvo el desempeño más deficiente.

Así pues, después de profundizar y analizar con detalle cada uno de los procesos y la investigación previa a la práctica, se podría exponer que al aditivo reductor de retracción cumplió óptimamente con su finalidad en las pruebas de retracción, principalmente en las probetas de 2x2x28.5cm ya que las dimensiones de estas no se ven influenciadas en gran medida por los agentes externos, sin embargo en las pruebas a mayor escala, en el caso de las losetas, se puede observar que esto sí fue así, ya que pudieron haber sufrido problemas de secado superficial exterior prematuro, que dieron como resultado una mayor deformación en la pieza, no tan significativo, pero sí que lo hubo.

Para poder comentar el desempeño de cada una de las muestras, es fundamental comenzar partiendo individualmente por cada uno de los 3 superplastificantes, con su respectivo contenido de aditivo reductor de retracción.

Para esto, cabe mencionar que, en los próximos párrafos, para una lectura más legible, los valores indicados en % se refirieren al porcentaje de aditivo reductor de retracción, mientras que los superplastificantes se indican como SP1, SP2 y SP3, finalmente el amasado de referencia como A REF.

En cuanto al SP1 si dejamos de lado las pruebas de loseta a mayor escala, las cuales se pudieron haber visto influenciadas por los agentes ambientales. Se puede observar en un principio, que el superplastificante por sí mismo, aumenta la retracción inicial del material, la cual con el tiempo la fue nivelando, tal como se puede ver en la comparación del 0% con el A REF en la figura 54. Por otra parte, efectivamente el aditivo reductor de retracción cumple su función ya que, conforme se va aumentando el porcentaje de este, la retracción tanto inicial como final va disminuyendo considerablemente.

Por último, se puede observar que en las pruebas a rotura, el 6% fue quien obtuvo los valores iniciales más bajos, los cuales al final los fue emparejando, esto se puede interpretar como que el aditivo reductor de retracción fungió como retardador de fraguado, reduciendo el calor generado en el proceso de hidratación, de tal forma que la adquisición de resistencia se postergo y tal como se vio anteriormente en el estado del arte, esto pudo generar una disminución en los fenómenos de retracción.

En cuanto al SP2 se puede comenzar diciendo, que este aditivo superplastificante en comparación con el SP1, mejora ampliamente su desempeño, a tal grado que la diferencia de rendimiento entre cada uno de los porcentajes añadidos es bastante reducida. Así que se piensa que este superplastificante por sí mismo cuenta con propiedades que reducen la retracción, de tal forma que se cuestiona la necesidad de incorporar dicho aditivo reductor de retracción, ya que por una

parte la diferencia de valores de retracción final entre cada uno de los porcentajes es insignificante, por otra parte, se puede observar que el 6% es quien sufre una retracción inicial menor, esta es seguida por el 0% por una diferencia de tan solo de 0.05mm.

Finalmente, al igual que con el SP1 se puede observar que el 6% quien fuera el que consiguió una menor retracción inicial, fue quien obtuvo los valores de rotura inicial más bajos, de la misma manera que el anterior, se puede pensar que el aditivo reductor de retracción creo un afecto de fraguado retardado.

El SP3 por su parte, se puede observar que tuvo un desempeño en cuanto a retracción final aún mejor que el SP2 ya que, si observamos la figura 55, únicamente el 3% está entre los valores del SP2, mientras que el resto los sobrepasa. Se puede percibir también que todo este trayecto de retracción fue paulatina a diferencia de las anteriores, no sufrió bajadas bruscas, las cuales pueden ser absorbidas con mayor facilidad por el material.

Si analizamos cada uno de sus porcentajes se podría determinar que los valores más bajos (0%,1%) son quienes arrojan los mejores resultados. mientras que el 0% tiene una retracción final con diferencia considerable con el resto, el 1% por su parte es quien obtuvo el mejor desempeño en la retracción inicial.

Así pues, resumiendo lo dicho anteriormente, se podría determinar que en cuanto a efectos de retracción el SP3 es el aditivo con el mejor desempeño, seguido por el SP2 y finalmente el SP1.

En cuanto al porcentaje añadido de aditivo reductor de retracción, es claro que para el SP1 entre más aditivo se añada mejor desempeño tendrá, de tal forma que el 6% es la mejor opción, mientras que, para el SP2 el 6% ligeramente por encima del 0% y finalmente para el SP3 se podría considerar que el 1% ligeramente por encima del 0%.

Esto nos quiere decir que el SP1 efectivamente requiere la utilización de aditivo reductor de retracción y entre más sea este, mejor será el resultado, mientras que para el SP2 y SP3 se podría afirmar que, si se pueden mejorar sus características con el aditivo reductor, sin embargo, estas mejoras son tan mínimas, que por sí mismo estos dos últimos tienen propiedades que los hace comportarse como reductores de retracción.

Por otra parte, si comentamos los resultados de las pruebas de las losetas, se podría decir que las diferencias son mínimas entre cada una de ellas y si bien, existe cierta tendencia especialmente con el SP1 que, a mayor cantidad de aditivo, mayor es la deformación que se obtuvo, estas comparándolas con las pruebas de retracción, se podría determinar que esto se debe completamente a la ausencia de un proceso de curado, ya que al reducirle el porcentaje de líquido

del aditivo reductor de retracción a la cantidad de agua en el amasado, esto se vio reflejado en una deficiencia en el proceso de hidratación, causando problemas por retracción plástica.

finalmente, los resultados de las pruebas de resistencia a rotura, en este caso se pueden dejar en segundo plano ya que, si bien actualmente no existe una normativa que determine la resistencia necesaria de este tipo de prefabricados con materiales HAC, como se mencionó anteriormente comparándolo con los datos de los fabricantes, las resistencias obtenidas entran entre el rango de estos, algunos inclusive los superan.

I. CONCLUSIONES.

Como conclusiones se podría comenzar diciendo, que todos los ensayos que se realizaron para esta práctica son importantes para evaluar el comportamiento que va a tener el material, sin embargo, para medir una relación directa con la retracción, especialmente cuando las diferencias de estas últimas son tan mínimas, estos ensayos se vuelven un tanto redundantes entre sí. Ya que, si bien tomando el ejemplo del SP1 con el 6% de aditivo reductor de retracción se puede observar que hay cierta relación en cuanto a la retracción inicial y la resistencia a rotura inicial, sin embargo, fuera de esto no se percibe un vínculo tan claro entre ambos.

Continuando con la metodología de ensayo, es claro qué se determinó que tipo de superplastificante es el que funciona mejor y como será el desempeño del aditivo reductor de retracción particularmente en el SP1, sin embargo para el SP2 y SP3, los resultados son un tanto variables debido a la diferencia tan mínima que hay entre estos, que si bien, se quisiera saber exactamente estos valores, se aconsejaría llevar a cabo cada uno de los ensayos independientemente, en cantidades más reducidas y controladas, dependiendo de la prueba que se quieran conocer sus características y finalmente para esto se recomienda ampliamente utilizar la cámara húmeda, para no sufrir problemas por cambios de temperatura ambientales.

En cuanto a las pruebas de losetas de gran tamaño se sugeriría aumentar el tamaño de las muestras por lo menos a 1.2m x 1.5mm, para lograr tener deformaciones más considerables y poder evaluarlo con resultados más críticos, esto no se hizo así en esta práctica debido al número de muestras y el espacio con el que se cuenta en el laboratorio de la EPSEB.

En cuanto al desempeño de los materiales probados, el efecto sinérgico entre los aditivos superplastificantes con los aditivos reductores de retracción, se podría decir que por una parte el SP1 sí que sugiere la existencia de tal efecto ya que entre más porcentaje se añade, menor fenómeno de retracción existirá, mientras que el SP2 y SP3 esta sinergia podría estar más en duda, ya que el

desempeño del supe plastificante es tan optimo por sí mismo y la variación de resultados es tan mínima, que cualquier agente externo, por más mínimo que fuera, puede tener una influencia tanto positiva como negativa en los mismos.

Si se tuviera que seleccionar uno de los tres aditivos superplastificantes, diría que esto también va a depender de diversos factores, por una parte, económicamente, sabemos que el SP1 podría resultar menos factible ya que, como se pudo ver, para este aditivo se tiene que añadir el doble de cantidad que los aditivos anteriores, duplicando así su coste, esto sin mencionar que para llegar a obtener los resultados similares a los otros dos superplastificantes, el porcentaje de aditivo anti retracción añadido tendría que ser del 6%, de tal manera que esto implica otro aumento más en dicho gasto. si bien los aditivos utilizados en esta práctica al ser materiales a prueba no se conoce su precio, con datos otorgados por MC Spain se sabe que estos aditivos superplastificantes rondaran los 0.75-2 €/kg y el aditivo reductor de retracción 3.5€/kg.

Por otra parte, la mano de obra es fundamental para la óptima utilización de estos productos, especialmente para el SP2 y SP3 ya que, por experiencia, se podría decir que la volatilidad de estos es tan elevada, que cualquier mínima variación tanto de dosis como en factores ambientales, podrían hacer que la mezcla pierda completamente sus propiedades, a diferencia que el SP1, el cual es ampliamente más sencillo de manipular. De tal forma que, si el fabricante se encuentra en ambientes climáticos un tanto extremos y no cuenta con materiales para llevar a cabo un buen proceso de curado, entonces el SP1 a pesar de ser más costoso y con resultados más bajos, es su mejor opción.

Finalmente, más que escoger el tipo de aditivo o la dosificación más optima, ya que se vio que cualquier dosificación funciona, con sus respectivas diferencias pero funciona, se podría decir que mantener un buen proceso de hidratación llevando a cabo un adecuado periodo de curado acarrea una mayor importancia que lo anterior, ya que al reducir la cantidad de agua utilizando estos productos, un aumento en la evaporación por causas ambientales, pueden generar ya sea problemas de tensión en las superficies, o una falta de hidratación de las partículas de cemento dando como resultado, deficiencias y problemas en el material. Al mismo tiempo que al utilizar estos productos en particular, se podría considerar un replanteamiento en la dosificación generad de la mezcla, ya que, al utilizar estos aditivos, ya sea independientes o en conjunto, se puede llegar a incrementar resistencias de hasta un 30%, de tal forma que así, se podría reducir la cantidad de cemento añadida y ya que como sabemos, un alto contenido de cemento siempre va a ser más propenso a sufrir fenómenos de retracción.